



EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y PETROGRÁFICAS Y SU INFLUENCIA EN LA MOLTURABILIDAD DE LOS CARBONES DEL SINCLINAL CHECUA-LENGUAZAQUE.

LIBARDO ALFONSO CORREA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
SOGAMOSO, BOYACÁ
2018**



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO GEÓLOGO

LIBARDO ALFONSO CORREA

**DIRECTOR: SANDRA ROCIO MANOSALVA SANCHEZ
C.PHD, INGENIERIA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
SOGAMOSO, BOYACÁ
2018**



NOTA DE ACEPTACION

DIRECTOR DE ESCUELA

DIRECTOR

JURADO

JURADO

LIBARDO CORREA CHAPARRO

3

RESUMEN

La presente investigación aporta información del comportamiento de la molturabilidad de los carbones influenciado por los análisis petrográficos y fisicoquímicos del sinclinal Checua-Lenguazaque en los bloques Sutatausa, Guachetá y Samacá.

Los carbones en el área presentan una Molturabilidad indicada por el índice de molienda Hardgrove de 58 a 121, se clasifican como bituminosos bajos, medios y altos volátiles según la norma (ASTM-D388-113), aglomerantes con bajos contenidos de cenizas y azufre. Se ha determinado mediante análisis de contenido maceral y de microlitotipos que presentan un comportamiento vitrico con altos contenidos de inertes y bajos contenidos de materia mineral.

Un análisis preliminar ha determinado una fuerte incidencia entre los parámetros que son predictores del rango del carbón, sugiriendo tres categorías acorde a la clasificación ASTM, se establece que para carbones bituminosos altos volátiles el HGI presenta índices inferiores a 70, para medios entre 70 y 100 y para bajos superiores a 100.

A partir del análisis estadístico se logra establecer que la reflectancia de la vitrinita y la materia volátil tienen un comportamiento incidente en el valor del índice de molturabilidad Hardgrove. La lectura maceral ha arrojado como posible predictor al grupo de la Liptinita que presenta una fuerte correlación disminuyendo su contenido a medida que aumenta el valor de HGI, sin embargo, no se descarta que puedan afectar el resultado final, por lo que se deben considerar en caso que se reporten valores “anómalos”.



DEDICATORIA

La culminación de este paso tan importante en mi vida la debo y la dedico primordialmente a Dios y mi familia, a mi madre Carmenza Chaparro por sus consejos, comprensión y apoyo en todo momento, a los docentes que influyeron en mi formación profesional, y a mis amigos por su apoyo moral e interés en la culminación de mi proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas e instituciones que contribuyeron para la realización de este trabajo, en primer lugar quiero agradecer a la profesora Sandra Rocío Manosalva directora del proyecto por creer en mí y motivarme a concluirlo de manera satisfactoria, a Juan Sebastián Gómez por su interés y disposición, a mi equipo de trabajo en CDT Mineral, a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por formarme como profesional, a las empresas MINAS Y MINERALES S.A, CARBOCOQUE y S.I. MILPA S.A por permitir realizar el muestreo; y a todas las personas que de una u otra manera hicieron parte del proceso.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. GENERALIDADES	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 Formulación del problema	11
1.3 JUSTIFICACIÓN	12
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES	13
ALCANCES	13
LIMITACIONES	13
1.5 ANTECEDENTES	14
1.6 OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
1.7 METODOLOGÍA	18
1.8 LOCALIZACIÓN	19
1.9 MARCO GEOLÓGICO	20
1.9.1 GEOLOGÍA LOCAL	20
1.9.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	20
1.9.3 ESTRATIGRAFÍA	21
2. CARACTERIZACION	28
2.1 Análisis Próximos ASTM D3172	28
2.2 Azufre ASTM D4239-13	30
2.3 molidurabilidad, Índice de molienda Hardgrove – HGI (NTC 3361- ASTM D409)30	
2.4 Reflectancia media aleatoria de la vitrinita ASTM D 2798-11a.....	32
2.5 Composición Maceral d2799-13	32
Grupo Huminita-Vitrinita	34
Grupo Liptinita	35
Grupo Inertinita	35



Materia mineral	36
Predominancia de macerales	38
2.6 Microlitotipos	39
Monomaceral	40
Bimaceral	41
Trimaceral	41
2.7 Rango del carbón	44
3. Análisis de resultados	45
3.1 Análisis preliminar	45
3.2 Correlación de los análisis fisicoquímicos con el HGI	47
3.2.1 Análisis próximos + Azufre + FSI vs HGI	47
3.3 Correlación de los análisis petrográficos con el HGI	55
3.3.1 Reflectancia media aleatoria de la vitrinita vs HGI	55
3.3.2 Conteo maceral vs HGI	55
3.3.3 Conteo microlitotipos vs HGI.	57
3.4 Análisis de regresion multiple	59
3.4.1 Supuesto de linealidad	59
3.4.2 Supuesto de normalidad de residuos.	61
3.4.3 Supuesto de independencia de residuos	64
3.4.4 Supuesto de homocedasticidad	64
3.4.5 Modelo matemático	65
4. Conclusiones	68
5. Bibliografía	71



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Correlación estratigráfica, modificada de Vega (2004) y Barrera (2016).	22
Tabla 2. Análisis próximos.....	28
Tabla 3. Análisis próximos secciones Sutatausa, Guachetá y Samacá.	29
Tabla 4 Análisis HGI, Azufre y Reflectancia Media de la Vitrinita.....	31
Tabla 5. Grupos macerales. Tomada de Pérez et al., (2018) y Diessel (1992).	33
Tabla 6 Composición maceral bloques Sutatausa, Guachetá y Samacá	36
Tabla 7. Clasificación de Microlitotipos. Tomado de ICCP (1971,1985).....	39
Tabla 8. Asociación maceral bloques Sutatausa, Guachetá y Samacá.....	43
Tabla 9. Clasificación de los carbones estudiados, organizados por rango en orden ascendente.....	46
Tabla 10. Coeficientes de correlación de Pearson, análisis próximos más azufre e hinchamiento.	48
Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson, composición maceral.....	56
Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson, conteo Microlitotipos.....	58
Tabla 13. Correlación lineal de Pearson, significancia.	60
Tabla 14. Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk.	61
Tabla 15. Constante Durbin-Watson.	64
Tabla 16. Coeficiente del modelo matemático SPSS a partir de los análisis próximos.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de trabajo.....	18
Figura 2. Mapa de localización del sinclinal Checua-Lenguazaque.	19
Figura 3. Mapa geológico, sinclinal Checua-Lenguazaque. Modificado de Barrera (2016).....	24
Figura 4. Columna Estratigráfica Sutatausa. Modificado de Barrera (2016).....	25
Figura 5. Columna Estratigráfica Guachetá. Modificado de Barrera (2016).	26
Figura 6. Columna Estratigráfica Samacá. Modificado de Barrera (2016).....	27
Figura 7. Grupos macerales del carbón. Fuente autor.	34
Figura 8. Diagrama ternario de composición maceral.	38
Figura 9. Grupo monomaceral del carbón (inertita). Fuente autor.....	40
Figura 10. Grupo bimaceral, Vitrinertita. Fuente autor.	41
Figura 11. Grupo trimaceral, duroclarita. Fuente autor.....	42
Figura 12. Relación entre la materia volátil y la reflectancia media de la vitrinita. .	44
Figura 13. Variación de HGI con el rango.	45
Figura 14. Relación entre materia volátil (Bslmm) y el HGI	49
Figura 15. Relación entre el HGI y el Carbono fijo.	50
Figura 16. Relación entre el HGI y Cenizas.	51
Figura 17. Relación entre el HGI y la Humedad.	52
Figura 18. Relación entre el HGI y azufre.	53
Figura 19. Relación entre el HGI y FSI.....	54
<i>Figura 20. Relación entre el HGI y la reflectancia media aleatoria de la vitrinita. .</i>	<i>55</i>
Figura 21. Diagrama de dispersión matricial para conteo maceral.....	56
Figura 22. Relación entre el HGI y el grupo maceral Liptinita.	57
Figura 23. Diagrama de dispersión matricial para las variables predictoras, software IBM SPSS Statistics.....	60
Figura 24. Histograma de normalidad, software IBM SPSS Statistics.....	62
Figura 25. Grafico P-P normal de regresión de residuos estandarizados, software IBM SPSS Statistics.	63
Figura 26. Gráfico de dispersión de puntos para homocedasticidad, software IBM SPSS Statistics.	65
Figura 27. Valor real de HGI vs valor modelo integrado.....	67

INTRODUCCIÓN

La molturabilidad del carbón, es un parámetro que permite inferir el comportamiento de los carbones durante la trituración, generalmente es determinado por el Índice de Molienda Hardgrove (HGI). Esta propiedad del carbón está relacionada con la composición maceral, cenizas y la madurez del carbón, principalmente (Sengupta, 2002).

Los carbones analizados corresponden al flanco occidental del sinclinal Checua-Lenguazaque, en los municipios de Sutatausa, Guachetá y Samacá, donde se encuentran carbones coquizables.

En total se analizaron 33 muestras, a las cuales se le realizaron análisis fisicoquímicos y mineralógicos, los cuales fueron clasificados según norma ASTM D388-12 como bituminosos altos volátiles a bituminosos bajos volátiles, con contenidos de azufre entre 0.35% y 1.85%.

El análisis petrográfico desarrollado muestra que los carbones están conformados por un 70,52% de vitrinita, 21,98% de Inertinita con bajos contenidos de materia mineral, los microlitotipos principales identificados fueron el monomaceral Vitrita y el bimaceral Vitrinertita.

Se estableció que los valores de HGI calculados se encuentran relacionados con el rango del carbón, distribuidos en tres rangos. Para carbones bituminosos altos volátiles el HGI presenta índices inferiores a 70, para medios entre 70 y 100, para bajos superiores a 100.

El análisis permitió establecer que en algunos casos las variaciones del valor de HGI está en relación con la distribución maceral especialmente con el grupo de la Liptinita, algunas variaciones del HGI se pueden asociar al incremento de las cenizas haciéndolos más fáciles de triturar, en relación con la humedad se ven afectados los carbones bituminosos altos volátiles.

El presente trabajo, pretende aportar información relevante para desarrollo investigativo en el área de carbones, estableciendo la manera más adecuada de predecir el Índice de Molienda Hardgrove para los carbones bituminosos del sinclinal Checua-Lenguazaque.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial se ha evidenciado que la molturabilidad, se encuentra principalmente relacionado con el rango del carbón, sin embargo para los carbones del sinclinal Checua-Lenguazaque, se tienen estudios muy generales que no han permitido establecer esta relación.

Este proyecto busca identificar a través del análisis de 33 muestras los rangos del Índice de Molienda Hardgrove (HGI) para el sector, y establecer si esta propiedad está relacionada con la composición maceral y otras propiedades del carbón.

El conocimiento de la dureza de los carbones en esta sub-cuenca permitirá determinar qué factores la controlan; lo cual es fundamental para la optimización del proceso de trituración en las plantas de coquización.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible establecer una relación entre la molturabilidad o Índice de Molienda Hardgrove (HGI) con las propiedades fisicoquímicas y petrográficas de los carbones presentes en el flanco occidental del Sinclinal Checua-Lenguazaque?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Colombia se constituye en el principal exportador de carbón de Latinoamérica, a países como Brasil, México, Cuba, India, Perú, Chile y algunos países europeos principalmente, donde es utilizado como generador de energía y para los procesos siderúrgicos.

En este proceso de transformación y beneficio de los carbones, se desarrolla un proceso de trituración inicial que permita llevarlos a la granulometría que requiere el proceso. Por tal motivo es muy importante determinar la dureza (molturabilidad), del carbón para proyectar el tipo de molino a utilizar, su capacidad y vida útil. Esta investigación busca establecer como varia el Índice de Molienda Hardgrove en los carbones del flanco occidental del sinclinal Checua-Lenguazaque, a partir de sus propiedades fisicoquímicas y petrográficas.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

- El proyecto de investigación pretende ampliar la información existente y generar inquietudes sobre el comportamiento de la molturabilidad del carbón y sus factores incidentes, específicamente para los de la Fm Guaduas, sector Checua-Lenguazaque.
- Se analizarán aspectos tanto petrográficos como físico-químicos de los carbones, que podrían ser determinantes para la identificación de variables que influyen en la dureza del carbón.
- Con base a la información establecida se pretende dar un avance sobre la incidencia de la petrografía y algunas determinaciones fisicoquímicas de los carbones muestreados con la molturabilidad (HGI), o cuales factores fundamentales lo controlan.

LIMITACIONES

- La investigación llevada a cabo se realizara en la Formación Guaduas, flanco occidental del sinclinal Checua – Lenguazaque, por lo tanto las conclusiones se ajustaran a las condiciones de los carbones en esta zona, y no será tomada como una valoración del posible comportamiento para todos los carbones explotables de Formación Guaduas en la zona centro de Colombia.
- El muestreo no tuvo en cuenta la secuencia estratigráfica completa de los carbones aflorantes en el sinclinal, por lo tanto no puede hacerse un estudio de la variación del índice de molienda Hardgrove con respecto a la profundidad y por ende no habrá correlación entre los mantos muestreados para las tres secciones propuestas (Sutatausa, Guachetá, y Samacá).

1.5 ANTECEDENTES

Sengupta (2002). Considera que El índice de molienda del carbón es un parámetro tecnológico importante para comprender el comportamiento y evaluar la dureza relativa de los carbones de diferentes rangos durante la trituración. Debido al carácter heterogéneo de los carbones en cuanto a madurez, componentes petrológicos, impurezas minerales, etc., así como el mecanismo de trituración; dicha determinación es bastante difícil, lo que conduce a una reproducibilidad y repetibilidad pobre del valor de HGI. En vista de tales problemas, realiza un nuevo intento de llegar a una correlación más fiable y reproducible del HGI con los análisis próximos, en más de 300 muestras de carbón, que cubren todos los yacimientos de carbón en la India.

Como resultado de la correlación, se obtuvo un índice, denominado Índice de Molienda Estadístico (SGI), que puede ser útil en la evaluación del comportamiento del carbón no solo en la trituración, sino también en su friabilidad frente a la emisión de polvo durante la trituración. La ecuación es de naturaleza estadística y está en función de los análisis próximos en base seca, humedad (M), cenizas (A), materia volátil (VM) y carbono fijo (FC) (ecuación 1).

$$SGI = 93.25 + (0.256 + 0.196M) + 3(1.097 - 0.009A) - 3(1.165 - 0.029VM) - 5(1.103 - 0.0166FC)$$

Ecuación 1. Determinación del SGI a partir de análisis próximos. Tomado de (Sengupta, 2002).

El coeficiente de correlación obtenido en este estudio fue de 0,93, que puede ser considerado como significativo. Antes de la formulación de la nueva correlación que se estableció, se tuvo en cuenta los problemas y dificultades habituales en la determinación HGI inherentes al proceso, en vista de esto, Sengupta (2002) concluye que, muchos intentos se han hecho en el pasado y todavía se están realizando para relacionar el HGI con innumerables propiedades analíticas del carbón. Pero hasta ahora, no ha sido posible una correlación satisfactoria porque el carbón es una sustancia muy compleja con propiedades variables, llegando entonces a la conclusión final de que, no es posible obtener una correlación perfecta.

Estudios realizados por Shahzad, Shahzad, Iqbal, & Hassan (2014) con el fin de encontrar alguna relación entre la molturabilidad y los análisis elementales de los carbones de la región de Punjab pertenecientes en su mayoría a carbones sub-bituminosos, con valores de HGI entre (57-92) mostraron que este valor se veía

influenciado por el contenido de cenizas y materia volátil, con contenidos de humedad inferiores al 3%.

En los primeros estudios de la posible relación de HGI con las propiedades petrográficas del carbón, se reporta a H. Heywood, (1935) (tomado de (Sengupta, 2002)), diciendo que “La complejidad del estudio de la capacidad de molienda se puede apreciar a partir del patrón de consumo de energía relativa en la molienda de los minerales y carbones”. Por otra parte, entre los constituyentes petrológicos, la durita requiere ocho veces más de revolución en comparación con la fusinita que es más suave, mientras que la clarita y la vitrinita requieren 2,6 veces y 3 veces, respectivamente, cuando se utiliza un molino de bolas para su molienda a un tamaño en particular.

Trimble & Hower (2003) utilizando un enfoque adaptado de Hower, Graese, & Klapheke (1987) con el fin de expandir la información petrográfica (Reflectancia Media de la Vitrinita y Análisis Microlitotipos) en relación con el HGI, seleccionaron muestras de carbón del este de Kentucky, con rangos de reflectancia de (0.75 – 0.80%, 0.85 – 0.90% y 0.95 – 1.00%), determinando:

- El contenido de cenizas tiene una tendencia a generar un aumento de HGI, por tal motivo tomaron en consideración los carbones con un contenido en cenizas inferior al 20%.
- El HGI adquiere una tendencia negativa, al ser correlacionado con el Microlitotipo Trimacerita.
- El Monomaceral Vitrita y Bimaceral Vitrinita tienen una contribución positiva a aumentar el HGI de los carbones.

Concluyendo que tanto el rango como la composición maceral tienen de alguna manera una influencia en las propiedades de molienda.

Por otra parte, investigadores como Jorjani, Hower, Chehreh Chelgani, Shirazi, & Mesroghli (2008) han realizado estudios en relación a la predicción del índice de molienda a partir de los resultados de análisis próximos y petrográficos. En este sentido, se evaluaron las propiedades de alrededor de 548 muestras de carbón tomadas del Este de Kentucky, donde se consideraron además las variaciones respecto a la humedad, para lo cual se utilizó el software SPSS. Como resultado se estableció que el HGI se podía calcular a partir de la siguiente fórmula (Ver ecuación 2):

$$\text{HGI} = 37,41 - 10,22 \ln (I_p) + 28,18 R_{\max} + S_{\text{total}}, \text{ donde } R^2 = 0,64.$$

Ecuación 2. Índice de molienda Hardgrove a partir de datos petrográficos y azufre. Tomado de (Hower, Jorjani, Chelgani, Shirazi, & Mesroghli, 2008).

Donde:

HGI: Índice de Molienda Hardgrove

R_{max}: Reflectancia máxima aleatoria de la vitrinita

L_p: Liptinita

S_{total}: Azufre total.

Dentro del área de estudio, se han llevado a cabo algunos estudios, Guatame & Sarmiento (2004) que clasifican los carbones de la Formación Guaduas en esta área desde Bituminosos Altos Volátiles C a Bituminosos Bajos Volátiles según la norma ASTM D388-89; y el de Barrera (2016) y Gómez & López (2017) que a partir de la ecuación de Baker lograron determinar los diferentes gradientes paleogeotérmicos del sinclinal Checua-Lenguazaque en las tres secciones propuestas concluyendo la variación del rango. Se ha encontrado de igual forma que el grupo maceral dominante para dichos carbones es el de la vitrinita indicando buena conservación de la materia orgánica precursora de acuerdo a los ambientes deposicionales que varían entre pantanos de bosque húmedo, ciénagas y zonas detrás de barrera con un nivel freático fluctuante (Gómez & López, 2017).

1.6 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la correlación de la molturabilidad del carbón con la petrografía orgánica y los análisis fisicoquímicos para los carbones bituminosos de la Formación Guaduas en el sinclinal Checua-Lenguazaque.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar, revisar y analizar la información bibliográfica concerniente al tema de interés.
- Caracterizar petrográficamente las muestras de carbón (reflectancia media de la vitrinita, contenido maceral y análisis de microlitotipos).
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de las muestras de carbón mediante análisis próximos, azufre y FSI.
- Determinar la resistencia mecánica (Molturabilidad) de las muestras de carbón mediante el índice de molienda Hardgrove (HGI).
- Establecer la relación entre la molturabilidad del carbón con las propiedades petrográficas y fisicoquímicas a partir del análisis estadístico multivariable.

1.7 METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico del proyecto inicio con una recopilación de información que permitió establecer las características geológicas del área en estudio, ubicación estratigráfica de los mantos de carbón e información preliminar de la caracterización de los carbones del área. La recopilación también estableció el estado del arte para el análisis de molturabilidad de los carbones.

En el desarrollo de los análisis se utilizaron 33 muestras de carbón, a los cuales se les determino las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas propuestas incluyendo análisis petrográficos y de dureza (HGI), parámetros principales del proyecto. Con la obtención de la caracterización se procedió a la realización de la correlación de los parámetros y obtención de resultados (Figura 1).

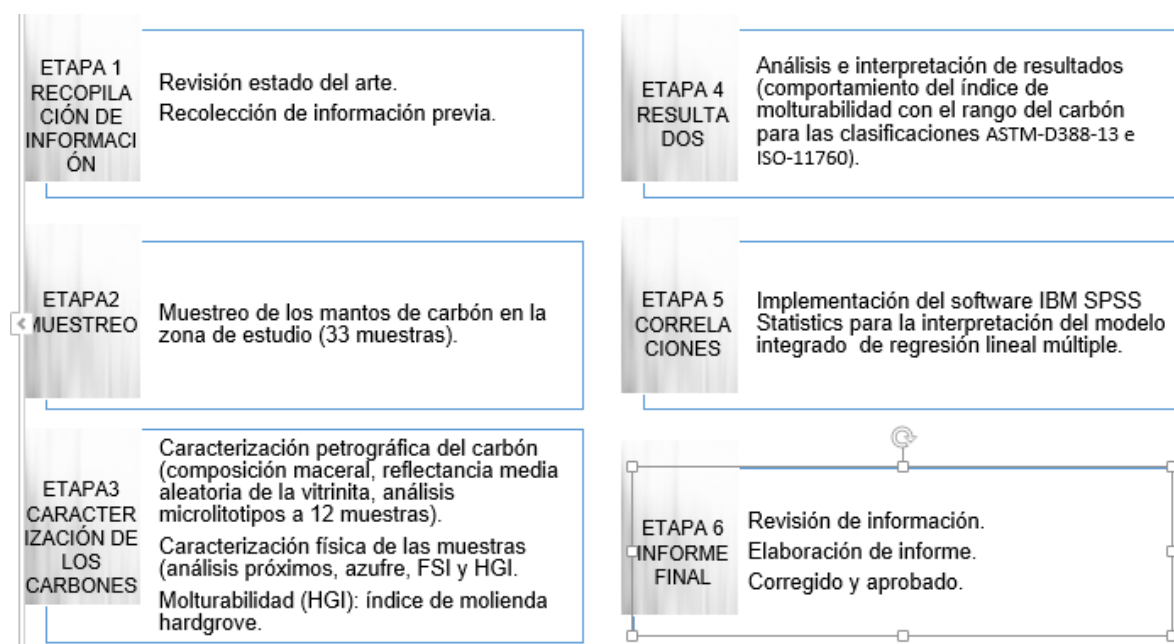


Figura 1. Metodología de trabajo.

1.8 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, sobre la cordillera oriental colombiana. Comprende los municipios de Sutatausa, Guachetá y Samacá, donde aflora la Formación Guaduas en una estructura geológica conocida como sinclinal de Checua – Lenguazaque con un área aproximada de 1900 km². El estudio se efectuó en el flanco occidental ya que los mantos resultan económicamente explotables.

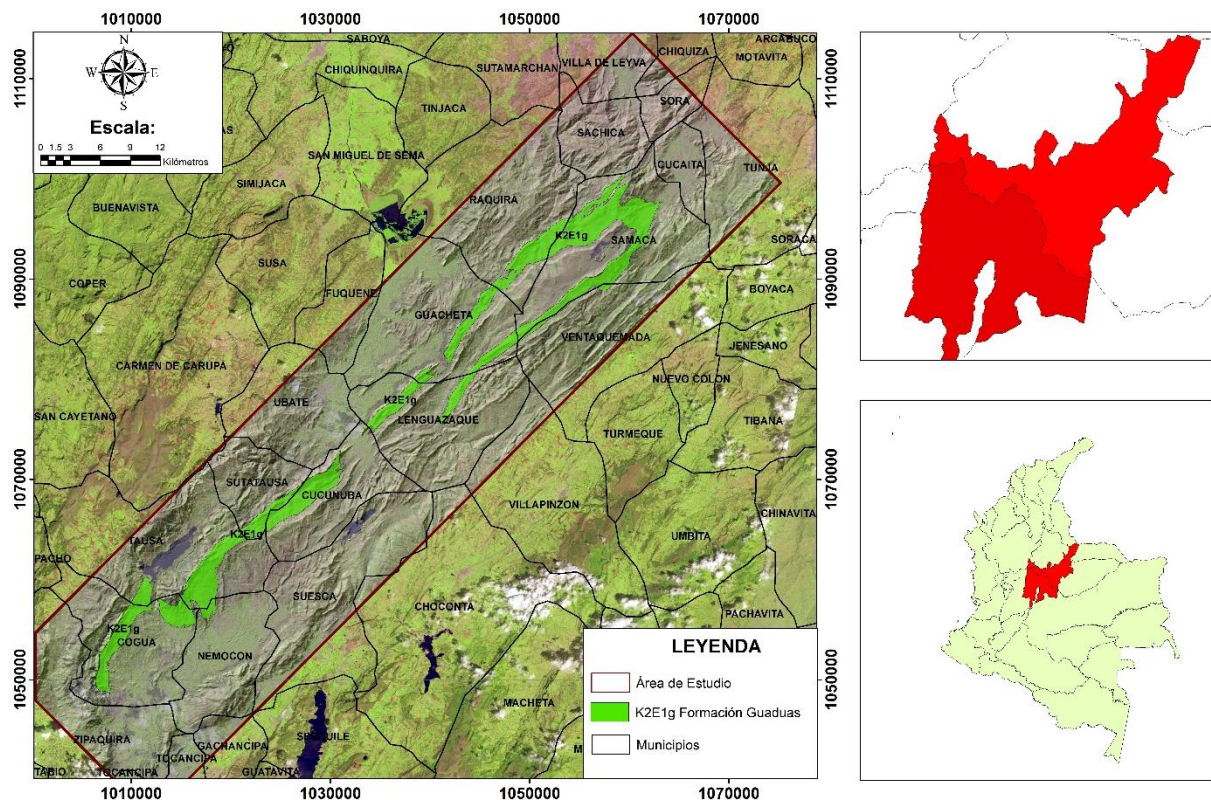


Figura 2. Mapa de localización del sinclinal Checua-Lenguazaque.

1.9 MARCO GEOLÓGICO

1.9.1 GEOLOGÍA LOCAL

La zona de estudio se encuentra localizada en la cordillera oriental, en el área conocida como Checua-Lenguazaque, con una extensión que abarca el departamento de Cundinamarca con 500 Km² y Boyacá con 175 Km² (Luna, 2004). Dentro del área afloran rocas de edad cretácica y paleógena pertenecientes a las formaciones Areniscas Dura, Plaeners, Areniscas de Labor, Tierna, Guaduas, Cacho y Bogotá cubiertos por depósitos Cuaternarios. En esta zona la Formación Guaduas tiene más de 1.000 m de espesor y se reconocen hasta 12 mantos de carbón, la formación se divide en cinco niveles o miembros de los cuales solo los niveles 2 y 3 contienen los carbones económicamente explotables (Mojica & Mariño, 2013).

1.9.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Geológicamente en el área la principal estructura es el sinclinal Checua-Lenguazaque, se extiende desde Cundinamarca (Zipaquirá y Lenguazaque) y se prolonga hasta el departamento de Boyacá (Samacá) presentándose en los alrededores un cierre estructural, es una estructura amplia, asimétrica cuyo eje presenta una dirección N45°E, con buzamientos promedios en el flanco occidental de 40°, y en el oriental entre 55° y 60° y en ocasiones invertido por la falla Cucunubá. Sobre el cierre del sinclinal los estratos son, prácticamente, horizontales con buzamientos menores a 10° (Luna, 2004).

Hacia el Sur, el sinclinal muestra algunos plegamientos menores y es cubierto por depósitos cuaternarios. El núcleo del sinclinal está conformado por rocas de la Formación Bogotá y Regadera, y en los flancos se encuentran las Formaciones Cacho y Guaduas.

En la parte norte, la estructura está afectada por Fallas de tipo inverso y transversal, que aumentan el grado de complejidad tectónica en la misma. En el flanco occidental afloran los estratos siguiendo un rumbo general de N40E, con buzamientos que van hasta 70° en la parte norte y hasta 45° al sur. (UPME, 2012).

1.9.3 ESTRATIGRAFÍA

La secuencia que aflora en la zona de estudio está comprendida por el Grupo Guadalupe como límite inferior, seguida de la Formación Guaduas (de importancia por ser la unidad carbonífera de interés), y como límite superior la Formación Cacho.

1.9.3.1 *Grupo Guadalupe*

Renzoni (1968) Redefinió el Grupo Guadalupe de base a techo en las siguientes unidades:

Formación Areniscas Dura.

Compuesta de un conjunto de areniscas cuarzosas de grano fino a medio de color gris a amarillo, friables con algunas intercalaciones de arcillolitas en la parte superior.

Formación Plaeners.

En la sección tipo tiene un espesor de 73 m y está representada por arcillolitas, liditas, limolitas y en menor proporción por areniscas de grano muy fino (Montoya, Diana María; Reyes, 2003).

Formación Arenisca Labor y Los Pinos.

Definida por Ujueta (1961) y Pérez, & Salazar, (1973). Está conformada por bancos gruesos de areniscas cuarzosas de grano fino, blancas que conforman el miembro Labor y lutitas negras intercaladas con areniscas cuarzosas que conforman el miembro Pinos.

Formación Areniscas Tierna.

Está compuesta por areniscas cuarzosas de color gris claro, de grano fino a medio, friables intercaladas con delgadas capas de lodolitas y limolitas silíceas. Su contacto con la formación Guaduas es concordante.

1.9.3.2 *Formación Guaduas*

Vega (2004) cita a Vander Hammen (1957) quien a partir de estudios palinológicos determinó la edad de la Formación Guaduas de Maastrichtiano Superior - Paleoceno Inferior. El nombre proviene de la sección tipo en la población de Guaduas, descrita originalmente por Hettner (1982), definiendo una secuencia de arcillolitas intercaladas con limolitas y areniscas (Vega, 2004).

Nigrinis (1975) establece una subdivisión de la Formación Guaduas con el fin de definir los niveles por sus características litológicas y morfológicas. Hubach (1975) la define como miembro inferior, miembro Medio y miembro Superior. Sarmiento (1991), establece nueve segmentos teniendo en cuenta los cambios verticales y la continuidad lateral de la Formación Guaduas. En el proyecto UPTC, Barrea (2016) levanto tres secciones estratigráficas, denominándolas miembro inferior (K2E1g1) donde es posible encontrar mantos de carbón de rango bituminoso bajo a medio volátil, miembro medio (K2E1g2) con mantos de carbón con rango de bituminosos medios a altos volátiles y el miembro superior (K2E1g3) donde afloran cintas de carbón de poco interés económico (tabla 1).

Tabla 1. Correlación estratigráfica, modificada de Vega (2004) y Barrera (2016).

Tabla 1: Correlación estratigráfica, mediodada de Vega (2007) y Laverde (2016).

CORRELACION ESTRATIGRAFICA						
FORMACIÓN		NIGRINIS (1975)	PROYEC TO UPTC (2016)	HUBACH (1975)	SARMIEN TO (1992)	LAVERDE (1979)
FORMACIÓN ARENISCAS CACHO						Conjunto 1
FORMACIÓN GUADUAS	Nivel arcilloso	KTg5	K2E1g3	Miembro superior	Ktg s-9	Conjunto 2, 3, 4 y 5
	Arenisca la Lajosa	KTg4			Ktg s-8	Conjunto 6
	Nivel con mantos de carbón	KTg3	K2E1g2	Miembro medio	Ktg s-7	Conjunto 7
	Areniscas la Guía	KTg2			Ktg s-6	
					Ktg s-5	
	Nivel arcilloso inferior	KTg1	K2E1g1	Miembro inferior	Ktg s-4	Conjunto 8
					Ktg s-3	
FORMACIÓN ARENISCAS TIERNA						Conjunto 10

Descripción de la Formación Guaduas propuesta por Nigrinis.

KTg1.

Se le denomina a la base de la Formación Guaduas, se encuentra en contacto neto con el grupo Guadalupe, su espesor varía entre 115-140m definida hasta la base de un banco de arenisca conocidas como Arenisca la Guía. Consiste en una

sucesión de arcillolitas grises claras y oscuras con intercalaciones de limolitas masivas con alto grado de oxidación, presenta cintas de carbón de poca importancia económica.

KTg2.

Es el de mayor importancia económica por contener los carbones de más alto rango y que producen los mejores coques en el área, se reconocen hasta 12 mantos de carbón en el flanco occidental, y seis, en el flanco oriental, con un espesor de 140-300m. Estratigráficamente, está constituido por una secuencia de arenitas de grano muy fino con intercalaciones de limolitas lodosas hacia la base; hacia la parte media superior se presenta un dominio alternante de arenitas y lodolitas y hacia la parte superior, presenta una secuencia limosa a arenítica.

KTg3.

Su espesor comprende desde el tope de la Arenisca La Guía hasta la base de a Arenisca Lajosa. Es el segundo en importancia desde el punto de vista económico. Se han reconocido seis mantos de carbón. Hacia el sur, el nivel está constituido por lodolitas y limolitas lodosas de color pardo, que incluyen lentes de arenitas. En la parte superior, predominan lodolitas de color pardo. Hacia el cierre del sinclinal se conservan las mismas características litológicas

KTg4.

Conocido como Arenisca Lajosa, se compone de areniscas de grano grueso a medio de color blanco, cuarzosa, con un espesor de 100-150m, presenta intercalaciones de mantos de carbón.

KTg5.

Va desde el tope de la Arenisca Lajosa hasta la base de la Formación Cacho, es una intercalación de arcillolitas masivas grises, limolitas oxidadas con capas de areniscas de grano fino a medio de color blanco, cuarzosas.

1.9.3.3 *Formación Cacho*

La Formación Cacho aflora a lo largo de los sinclinales de Río Frío, Zipaquirá, Checua, Teusacá-Suesca, Sesquilé, Sisga y Sueva. Esta unidad forma un relieve pronunciado por lo cual es fácilmente cartografiable; es infrayacida por la Formación Guaduas y suprayacida por La Formación Bogotá. Se reconoce en ella una sola secuencia arenosa como es el caso del Sinclinal de Sueva, o dos niveles arenosos separados por uno arcilloso en Lenguaque (Montoya, Diana María; Reyes, 2003). Estratigráficamente está compuesta por areniscas cuarzosas de grano grueso de color blanco-amarillento con estratificación cruzada con intercalaciones de arcillolitas, con un espesor promedio de 300m.



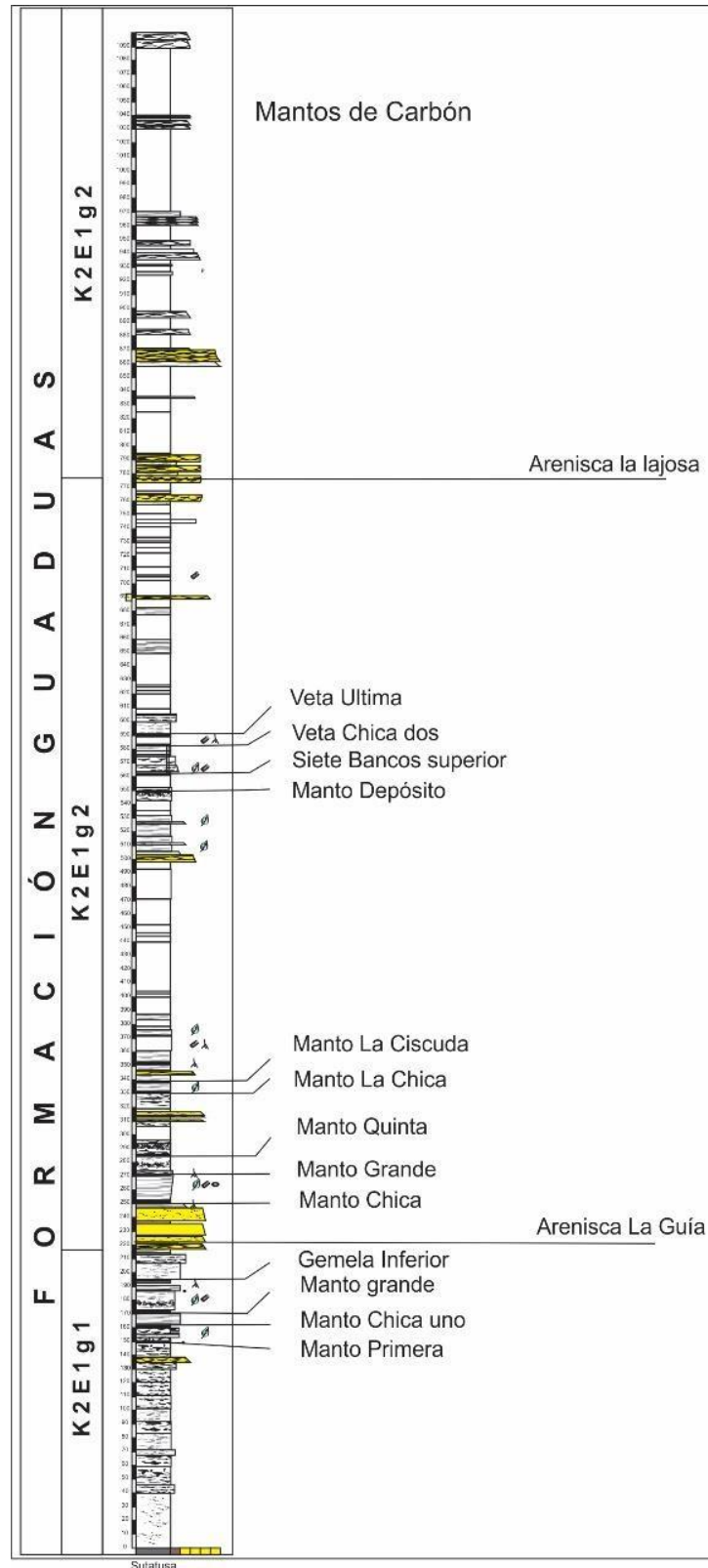


Figura 4. Columna Estratigráfica Sutatausa. Modificado de Barrera (2016).

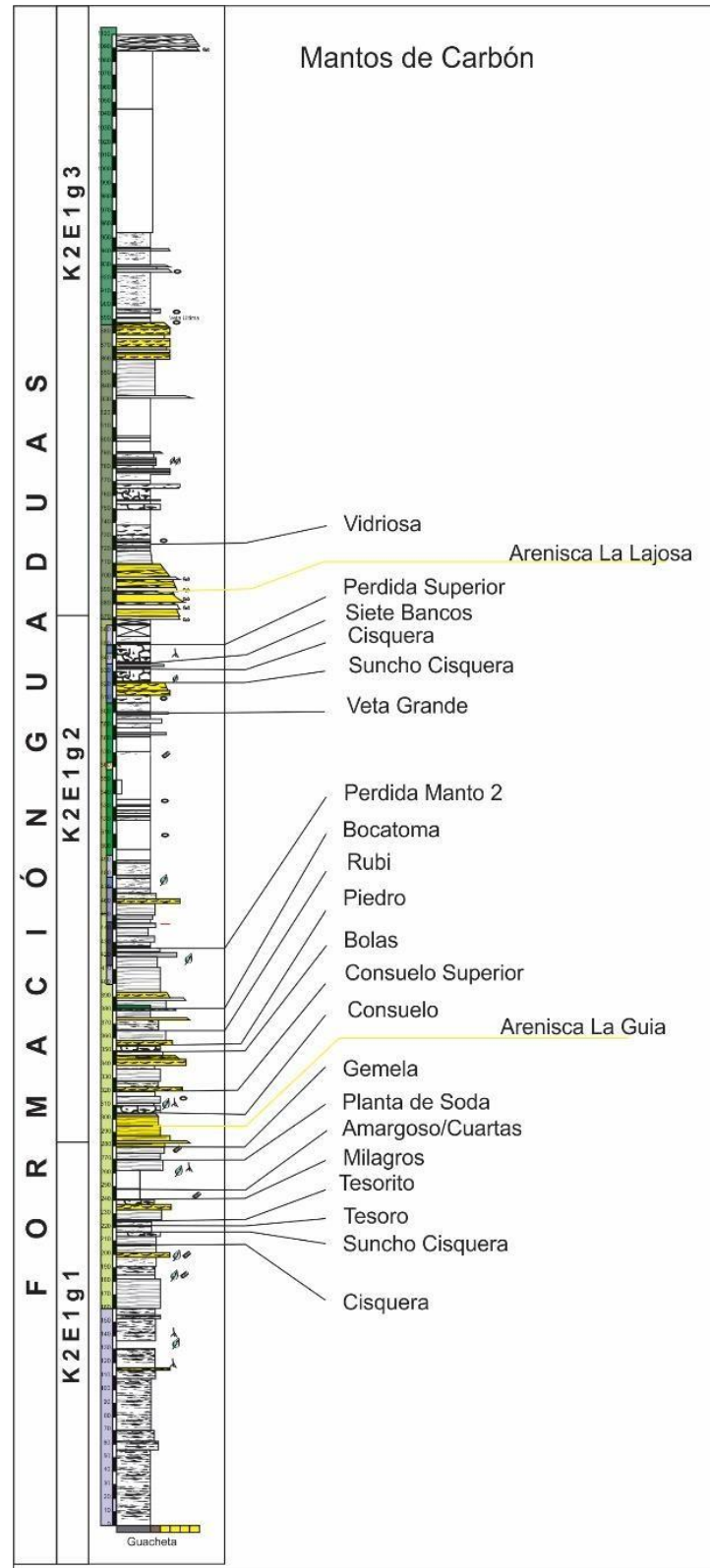


Figura 5. Columna Estratigráfica Guachetá. Modificado de Barrera (2016).

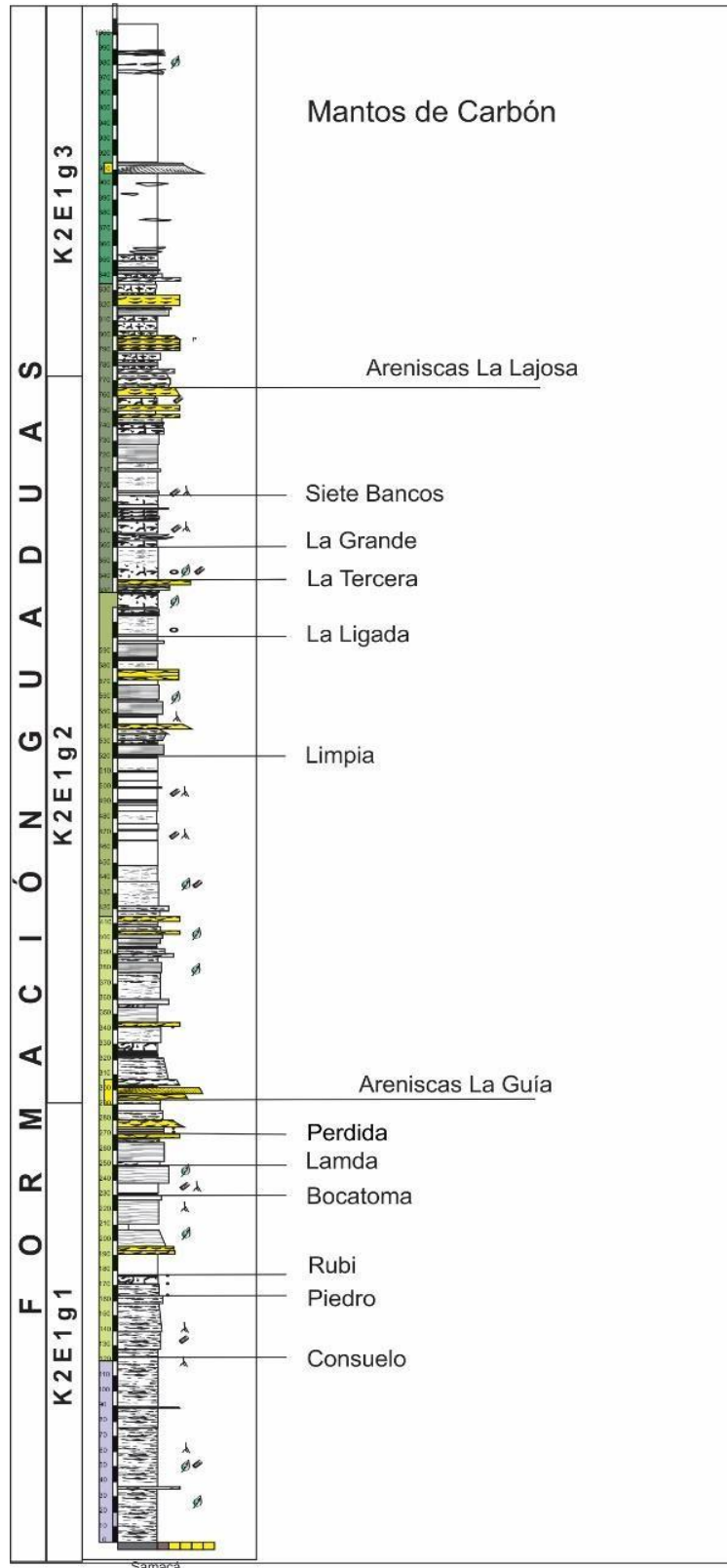


Figura 6. Columna Estratigráfica Samacá. Modificado de Barrera (2016).

2. CARACTERIZACION

En el desarrollo de la caracterización fueron analizadas 33 muestras de carbón recolectadas en los municipios de Sutatausa, Guachetá y Samacá, a las cuales se les desarrollaron análisis próximo completo, petrográficos y de HGI.

Los carbones son clasificados con el objetivo de identificar sus posibles áreas de uso, existiendo diferentes estándares para su ejecución. Para este estudio la clasificación se realizó utilizando las normas ASTM.

2.1 ANÁLISIS PRÓXIMOS ASTM D3172

Según la norma ASTM D3172 se define como la determinación de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo a los análisis próximos o inmediatos (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis próximos.

ANALISIS	NORMA
HUMEDAD RESIDUAL	ASTM D3173-17
CENIZAS	ASTM D3174-12
MATERIA VOLATIL	ASTM D3175-17
CARBONO FIJO	ASTM D3172

Los carbones analizados presentan una humedad residual inferiores a 1,5%, relativamente bajas favoreciendo la molienda e impidiendo las posibles aglomeraciones; los contenidos de ceniza no tienen una tendencia clara y se puede evidenciar heterogeneidad en los resultados, el valor más alto se encuentra en el bloque Guachetá con un 15,35%. Los valores de azufre fluctúan entre 0,35% y 1,85 %. La materia volátil para el bloque Sutatausa oscila entre 27% - 34 %, para el bloque Guachetá del 17% al 30% y para Samacá de 19% a 34%, con base en los resultados se puede inferir una tendencia hacia el bloque Sutatausa de contener carbones con contenidos de materia volátil (Tabla 3).

Así mismo se han clasificado las muestras teniendo en cuenta la norma ASTM-D388-113 en los bloques de:

- Sutatausa: Carbones bituminosos Altos volátiles tipo A.

- Guachetá: Carbones bituminosos Altos volátiles tipo A, Carbones bituminosos medios volátiles y carbones bituminosos bajos volátiles.
- Samacá: Carbones bituminosos Altos volátiles tipo A, Carbones bituminosos medios volátiles y carbones bituminosos bajos volátiles.

Tabla 3. Análisis próximos secciones Sutatausa, Guachetá y Samacá.

ID	BLOQUE	MANTO	HR %	CZ (bs)%	MV (bs) %	CF (bs) %	ASTM D388-113
1941	Sutatausa	Gemela inferior, m-4	0,74	6,87	27,81	65,32	BMV
1945	Sutatausa	Manto primera (veta primera)	0,82	6,25	28,52	65,23	BMV
1949	Sutatausa	la quinta	1,49	5,93	31,42	62,65	BAV
1952	Sutatausa	Siete bancos inferior	0,75	11,36	29,13	59,51	BAV
1953	Sutatausa	chica 2	0,87	2,74	33,44	63,82	BAV
1993	Guachetá	Suncho cisquera	0,26	15,35	25,99	58,66	BMV
1994	Guachetá	Cisquera nivel 80	0,38	5,29	29,78	64,93	BMV
1996	Guachetá	Cisquera nivel 180	0,54	5,20	29,18	65,62	BMV
1997	Guachetá	Tesorito	0,48	6,78	17,75	75,47	BBV
2001	Guachetá	Milagros	0,81	4,95	20,86	74,19	BBV
2002	Guachetá	Consuelo	0,25	10,78	17,54	71,68	BBV
2003	Guachetá	Consuelo superior	0,41	9,25	19,84	70,91	BBV
2004	Guachetá	Piedro	0,71	5,97	20,41	73,62	BBV
2007	Guachetá	Bocatoma nivel 220	0,66	8,85	19,91	71,24	BBV
2008	Guachetá	Veta grande	0,87	9,58	27,69	62,73	BMV
2009	Guachetá	Tesorito	0,79	5,93	29,48	64,59	BMV
2010	Guachetá	Cisquera (nivel3)	0,68	2,54	27,26	70,20	BMV
2011	Guachetá	Tesoro	0,51	8,20	28,78	63,02	BMV
2012	Guachetá	La pérdida (manto 2)	0,63	10,48	30,34	59,18	BAV
2079	Samacá	La tercera (superior del (sinclinal)	0,69	5,02	33,73	61,25	BAV
2080	Samacá	La tercera (inferior de un (sinclinal)	0,63	6,02	33,07	60,91	BAV
2082	Samacá	La grande	0,77	10,40	27,58	62,02	BMV
2083	Samacá	Bocatoma (l)	0,48	4,51	21,43	74,06	BMV
2089	Samacá	Perdida superior (k)	0,41	4,23	22,99	72,78	BMV
2090	Samacá	Perdida inferior	0,47	4,84	22,87	72,29	BMV
2093	Samacá	Piedro superior (n)	0,56	8,25	19,75	72,00	BBV
2094	Samacá	Bocatoma	0,75	5,15	21,99	72,86	BMV
2096	Samacá	Rubí inferior	0,23	8,52	18,06	73,42	BBV
2140	Samacá	Tesorito	0,48	6,57	21,04	72,39	BBV
2141	Samacá	Tesoro	0,62	9,21	24,24	66,55	BMV
2142	Samacá	Ciscuda (cisquera)	0,64	4,89	21,92	73,19	BMV
2143	Samacá	Siete bancos	1,13	12,73	26,76	60,51	BMV
2143	Samacá	Gemela superior	0,87	6,68	25,51	67,81	BMV

2.2 AZUFRE ASTM D4239-13

Es un análisis elemental realizado al carbón, determinado a partir de métodos de oxidación, descomposición y/o reducción. Se presenta en tres formas:

- ✓ Azufre Pirítico
- ✓ Azufre Orgánico
- ✓ Azufre Sulfático

En el análisis desarrollado fue determinado el contenido de azufre total, para los tres bloques los valores de azufre fluctúan entre 0,35% y 1,85 %, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 4.

2.3 MOLTURABILIDAD, ÍNDICE DE MOLIENDA HARDGROVE – HGI (NTC 3361- ASTM D409)

La capacidad de molienda (es decir, la facilidad de molienda) del carbón es una importante propiedad práctica y económica para la manipulación del carbón y la utilización, particularmente para utilidades del pulverizado del carbón. La molturabilidad o capacidad de molienda del carbón suele medirse por índice de molienda Hardgrove (HGI), también conocido como índice de molturabilidad, es de gran interés, ya que se utiliza como una herramienta predictiva para determinar la capacidad de rendimiento de calderas de la industria de las termoeléctricas. Los estudios de trituración, y el HGI resultante, permiten a usuarios de carbón de varios tipos evaluar el futuro rendimiento del carbón en sus molinos, y estimar los requisitos de energía para la trituración y las capacidades de rendimiento. En general, las características de la capacidad de molienda del carbón reflejan su dureza, la tenacidad y la fractura que se ven influenciadas por el rango, petrografía, y; la distribución y los tipos de minerales (Vuthaluru, Brooke, Zhang & Yan, 2003).

Los carbones coquizables del sinclinal Checua-Lenguazaque presentan una distribución preferencial con respecto a la molturabilidad, para los carbones de la sección Sutatausa el índice de molienda hardgrove tiende a ser bajo indicando mayor resistencia a ser triturados con un índice promedio de 67, los carbones muestreados en la sección Samacá la molturabilidad presenta valores intermedios entre 58 a 108 en HGI, la sección de Guachetá presenta los valores más altos de Índice de Molienda Hardgrove por ende ofrecen menor resistencia y más vulnerables a la friabilidad (Tabla 4).

Tabla 4 Análisis HGI, Azufre y Reflectancia Media de la Vitrinita.

ID	BLOQUE	MANTO	HGI	AZT(bs) %	Ro MEDIA	CLASIFICACION ISO-11760
1941	Sutatausa	Gemela inferior, m-4	75	0,42	0,95	BC
1945	Sutatausa	Manto primera (veta primera)	70	0,94	0,95	BC
1949	Sutatausa	la quinta	61	0,44	0,85	BC
1952	Sutatausa	Siete bancos inferior	58	0,42	0,88	BC
1953	Sutatausa	chica 2	74	0,56	0,89	BC
1993	Guachetá	Suncho cisquera	86	1,85	1,03	BB
1994	Guachetá	Cisquera nivel 80	83	0,82	1,06	BB
1996	Guachetá	Cisquera nivel 180	79	0,91	1,07	BB
1997	Guachetá	Tesorito	120	0,35	1,53	BA
2001	Guachetá	Milagros	121	0,50	1,45	BA
2002	Guachetá	Consuelo	121	0,41	1,48	BA
2003	Guachetá	Consuelo superior	103	0,48	1,38	BB
2004	Guachetá	Piedro	114	0,66	1,25	BB
2007	Guachetá	Bocatoma nivel 220	98	0,57	1,39	BB
2008	Guachetá	Veta grande	68	1,36	0,96	BC
2009	Guachetá	Tesorito	75	0,57	1,01	BB
2010	Guachetá	Cisquera (nivel3)	90	0,49	1,08	BB
2011	Guachetá	Tesoro	81	0,62	1,05	BB
2012	Guachetá	La pérdida (manto 2)	65	0,49	0,94	BC
2079	Samacá	La tercera (superior del (sinclinal)	70	1,12	0,89	BC
2080	Samacá	La tercera (inferior de un (sinclinal)	61	1,55	0,85	BC
2082	Samacá	La grande	73	1,08	0,93	BC
2083	Samacá	Bocatoma (I)	99	0,46	1,41	BA
2089	Samacá	Perdida superior (k)	97	0,60	1,27	BB
2090	Samacá	Perdida inferior	99	0,69	1,29	BB
2093	Samacá	Piedro superior (n)	99	0,62	1,44	BA
2094	Samacá	Bocatoma	99	0,49	1,33	BB
2096	Samacá	Rubí inferior	112	0,55	1,45	BA
2140	Samacá	Tesorito	92	0,45	1,27	BB
2141	Samacá	Tesoro	96	0,48	1,25	BB
2142	Samacá	Ciscuda (cisquera)	108	0,45	1,33	BB
2143	Samacá	Siete bancos	76	1,82	0,93	BC
2144	Samacá	Gemela superior	85	0,52	1,24	BB

2.4 REFLECTANCIA MEDIA ALEATORIA DE LA VITRINITA ASTM D 2798-11A

La reflectancia es un método que permite realizar la identificación del rango del carbón utilizando el fotómetro y microscopio. A nivel siderúrgico este análisis se utiliza para identificar las mezclas de carbón en pila para proyectar el valor de la resistencia al coque.

La reflectancia es una propiedad que está relacionada con la aromaticidad de los componentes orgánicos del carbón. Por lo tanto, la reflectancia se incrementa para todos los macerales a medida que el grado de evolución del carbón aumenta (Pérez, Borrego, Sierra, Algarra, & Montes, 2018).

En los carbones analizados, los resultados de reflectancia (R_o) fueron obtenidos utilizando la norma ISO-11760, encontrándose valores entre 0.85 y 1.48% (tabla 4), permitiendo establecer que en las tres secciones analizadas se presentan carbones bituminosos tipo A, B, C:

- Sutatausa: Carbones bituminosos tipo C.
- Guachetá: Carbones bituminosos tipo C, B y A.
- Samacá: Carbones bituminosos tipo C, B y A

2.5 COMPOSICIÓN MACERAL D2799-13

Microscópicamente, el carbón se constituye de varios componentes orgánicos llamados macerales, Stopes (1935) se refiere a los fragmentos de origen vegetal que son acumulados bajo el agua. Por lo tanto, los macerales son los restos carbonizados de diversos tejidos vegetales o sustancias derivadas de las plantas existentes en el momento de la formación de la turba. Según Gomez (2015) Algunos macerales representan parcialmente formas y estructuras de las plantas que han sido preservados otros en cambio son producto de degradación y se encuentran tan alterados que su origen no puede ser determinado.

Se caracterizan en términos de sus propiedades ópticas: Reflectancia, Fluorescencia, Color y Forma; donde se distinguen tres grupos macerales: Huminita-Vitrinita, Liptinita e Inertinita (Tabla 5) (Figura 7).

Tabla 5. Grupos macerales. Tomada de Pérez et al., (2018) y Diessel (1992).

MACERALES			
GRUPO		MACERAL	ORIGEN
VITRINITA	TELOVITRINITA	Telinita	Paredes celulares de tejido vegetal.
		Collotelinita	Tejido vegetal gelificado. Homogéneo. Suele presentar fisuras o grietas.
	DETROVITRINITA	Collodetrinita	Masa fundamental que incluye otros macerales.
		Vitrodetrinita	Fragmento de vitrinita (<10 micras) de forma variable rodeados de otros macerales.
	GELOVITRINITA	Corpogelinita	Cuerpos homogéneos y discretos que representan rellenos celulares.
		Gelinita	Materia homogénea, sin estructura que rellena huecos. Rellenando Telinita.
LIPTINITA		Esporinita	Membrana exterior de esporas.
		Cutinita	Cutículas de hojas. Muy delgadas.
		Resinita	Cuerpos ovales. Rellenando telinita.
		Alginita	De origen algal o bacteriano
		Suberinita	Tejido suberoso (Corcho). Paredes celulares más o menos deformadas.
		Exudatinita	Proceden de exudados ricos en H alojados en grietas o cavidades.
		Liptodetrinita	Fragmentos de macerales del grupo liptinita no asignables a ningún maceral específico.
		Clorofilinita	Deriva de restos de clorofila de las plantas. Sólo se identifica en lignitos y turba.
		Bituminita	Productos de degradación de material algal o bacteriano.
INERTINITA	TELOINERTINITA	Fusinita	Paredes celulares poco deformadas
		Semifusinita	Paredes celulares deformadas (Menos reflectancia que la fusinita).
		Funginita	Deriva de tejidos de hongos, incluye esporas.
	DETROINERTINITA	Micrinita	Cuerpos muy pequeños redondeados (Punteado claro). Maceral de origen secundario.
		inertodetrinita	Fragmentos <10 micras del grupo Inertinita.
	GELOINERTINITA	Secretinita	Secreciones celulares Puede derivar de resinita o corpogelinita oxidada.
		Macrinita	Puede presentarse cementando otros macerales o como cuerpos discretos ovales, > 10 micras, sin estructura celular (Gel amorfo).

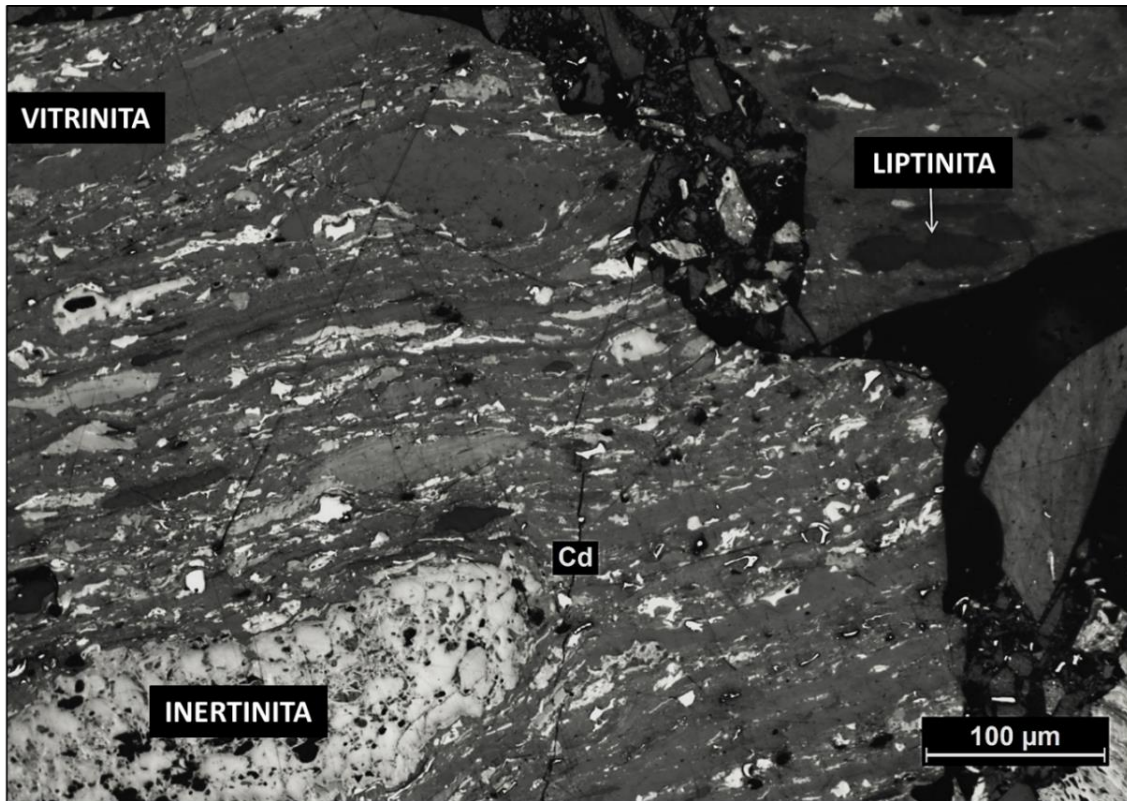


Figura 7. Grupos macerales del carbón. Fuente autor.

Grupo Huminita-Vitrinita

Presentan un color gris intermedio y bastante homogéneo cuando son observados con el microscopio de luz reflejada. La clasificación de los macerales dentro del grupo se establece en función del grado de preservación de los tejidos. Deriva de la celulosa y lignina presente en los tejidos de las plantas superiores (ramas, raíces, tallos, hojas). Es un grupo maceral abundante en la mayoría de los carbones, siendo mayoritario en muchos de ellos. (Pérez et al., 2018). Los componentes de este grupo cambian de nombre al tener un mismo origen pero con un rango de evolución distinto: En los lignitos se denominan grupo huminita, y en los carbones bituminosos y antracitas vitrinita.

En el análisis de las 33 muestras, se determinó que el maceral predominante es la Vitrinita con porcentajes para el bloque Sutatausa de 57% y 77%, Guachetá de 65% y 77% y Samacá 55% y 75% respectivamente, los macerales más abundantes son la colodetrinita y la colotelinita. Este grupo maceral se caracterizó por presentar

buena conservación de la materia orgánica y permitió establecer el rango del carbón a partir de reflectancia media aleatoria de la vitrinita.

Grupo Liptinita

Según Pérez et al., (2018) los macerales del grupo liptinita presentan un color gris oscuro a negro en inmersión en aceite, a veces algo transparente (baja reflectancia). Siempre más oscura que la vitrinita de la misma muestra. Presenta fluorescencia al ser iluminada con luz azul-violeta. Deriva de organismos específicos (algas, bacterias) o de partes de plantas superiores constituidas por sustancias no humificables: órganos de protección, reproducción, secreciones. Se incluye en el grupo algunos productos generados durante la carbonificación. Los macerales del grupo de la Liptinita se identifican por sus morfologías características. Muchas de sus características distintivas solo son visibles utilizando luz fluorescente. Los macerales de este grupo convergen en sus propiedades ópticas con la vitrinita y dejan de ser identificables en el paso de carbón bituminoso B a A (ISO 2005).

Es el grupo maceral en menor proporción, en algunas muestras no supera el 8% y en su mayoría apenas se logran reconocer, se induce este comportamiento a que son carbones con un alto grado de carbonificación o evolución de la materia orgánica y el maceral Liptinita tiende a desaparecer, los macerales de este grupo que más se reconocen son la resinita y la cutinita (Tabla 6).

Grupo Inertinita

Según Pérez et al., (2018). El grupo Inertinita incluye tejidos de plantas superiores en varios estados de compactación o fractura y fragmentos de material amorfo gelificado alterados por procesos redox o bioquímicos, tejidos de hongos, material finamente granular formado durante la carbonificación y secreciones celulares. Esta alteración consiste fundamentalmente en procesos de pirolisis/combustión parcial (rápida) en incendios forestales, o alteración lenta debida a microorganismos (alteración bioquímica) o a oscilaciones del nivel freático, con lo que el material queda expuesto al aire (meteorización).

El resultado es un incremento de la reflectancia debido a una pérdida de volátiles, acompañada de un aumento de la aromaticidad, presenta un color gris claro a blanco amarillento, más clara que la vitrinita del mismo carbón y de mayor

reflectancia que esta última y ausencia de fluorescencia con un relieve característico debido a su dureza.

Corresponde al segundo maceral predominante con porcentajes de (11 a 40.2) %, la heterogeneidad de este grupo maceral indica posibles variaciones en el nivel freático durante la depositación lo cual favoreció y/o inhibió la rápida oxidación de la materia orgánica precursora en la turba, evidente por la heterogeneidad de macerales que componen este grupo como la fusinita, semifusinita, macrinita micrinita entre otros; el valor más alto lo presenta el manto Gemela Superior con 40.2% (tabla 14).

Materia mineral.

A partir de este análisis también se distinguen los casos en los que los componentes orgánicos; sulfuros, minerales arcillosos y ferruginosos son abundantes o significativos entre los macerales, el manto Suncho izquierda del bloque Guachetá presenta los contenidos más altos de materia mineral 18%, (Tabla 6).

Tabla 6 Composición maceral bloques Sutatausa, Guachetá y Samacá

ID	BLOQUE	MANTO	V (%)	L (%)	I (%)	Mm (%)
1941	Sutatausa	Gemela inferior, m-4	65,60	2,40	27,80	4,20
1945	Sutatausa	Manto primera (veta primera)	76,80	2,00	18,40	2,80
1949	Sutatausa	la quinta	69,20	3,00	25,60	2,20
1952	Sutatausa	Siete bancos inferior	57,40	6,00	32,40	4,20
1953	Sutatausa	chica 2	74,80	5,00	19,80	0,40
1993	Guachetá	Suncho izquierda	67,40	3,00	11,60	18,00
1994	Guachetá	Cisquera nivel 80	70,60	4,60	21,80	3,00
1996	Guachetá	Cisquera nivel 180	74,40	1,40	20,80	3,40
1997	Guachetá	Tesorito	68,80	0,40	26,60	4,20
2001	Guachetá	Milagros	82,60	1,20	13,20	3,00
2002	Guachetá	Consuelo	69,20	0,80	20,60	9,40
2003	Guachetá	Consuelo superior	83,20	0,20	14,00	2,60
2004	Guachetá	Piedro	65,80	1,60	28,40	4,20
2007	Guachetá	Bocatoma nivel 220	75,40	0,40	16,60	7,60
2008	Guachetá	Veta grande	68,20	6,80	15,80	9,20

2009	Guachetá	Tesorito	68,60	5,00	21,00	5,40
2010	Guachetá	Cisquera (nivel3)	67,20	2,00	30,00	0,80
2011	Guachetá	Tesoro	72,80	6,80	14,00	6,40
2012	Guachetá	La pérdida (manto 2)	76,40	5,40	13,00	5,20
2079	Samacá	La tercera (superior del (sinclinal)	70,60	7,80	18,20	3,40
2080	Samacá	La tercera (inferior de un (sinclinal)	70,20	5,60	23,20	1,00
2082	Samacá	La grande	67,00	2,20	26,60	4,20
2083	Samacá	Bocatoma (l)	74,00	1,20	23,00	1,80
2089	Samacá	Perdida superior (k)	66,40	1,40	30,80	1,40
2090	Samacá	Perdida inferior	67,20	1,20	27,40	4,20
2093	Samacá	Piedro superior (n)	72,60	1,00	21,60	4,80
2094	Samacá	Bocatoma	62,80	1,60	30,40	5,20
2096	Samacá	Rubí inferior	72,80	0,60	18,60	8,00
2140	Samacá	Tesorito	71,00	1,40	24,00	3,60
2141	Samacá	Tesoro	77,60	1,80	9,20	11,40
2142	Samacá	Ciscuda (cisquera)	73,80	1,80	23,00	1,40
2143	Samacá	Siete bancos	71,00	5,20	17,60	6,20
2144	Samacá	Gemela superior	55,80	2,00	40,20	2,00

Predominancia de macerales

Los carbones encontrados en el área del sinclinal Checua-Lenguazaque pueden considerarse como carbones vitricos debido a la alta concentración de macerales del grupo de la vitrinita, lo cual los hace óptimos para su uso en el proceso de coquización; estos presentan una tendencia fusica debido a procesos oxidantes durante la depositación; como es de esperarse, dichos materiales tienen bajos valores de liptinita (Figura 8) debido a la desaparición de este grupo maceral con el incremento del rango. Para la representación en el diagrama ternario fue necesario realizar un recalcu del porcentaje obviando el contenido de materia mineral ya que este es un constituyente inorgánico.

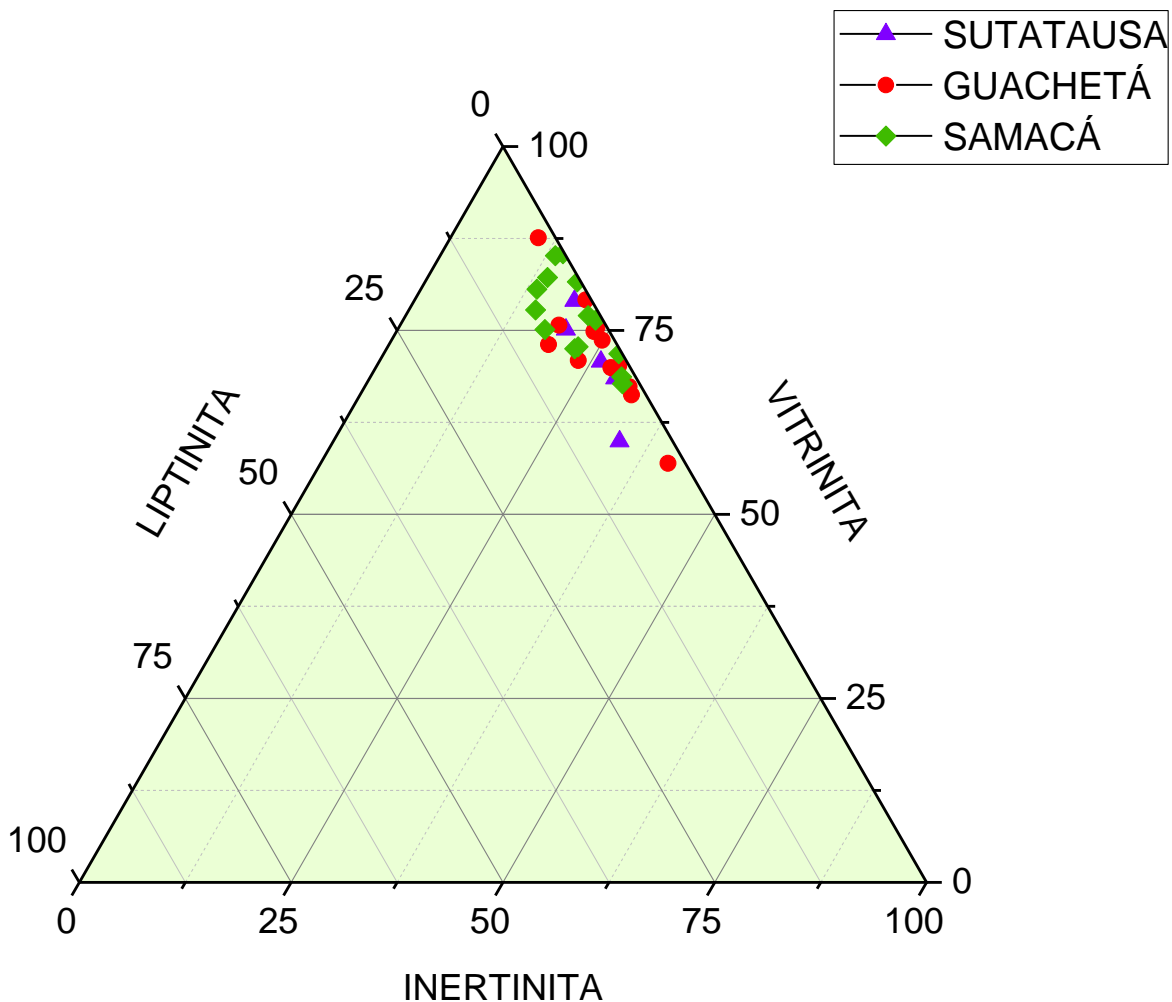


Figura 8. Diagrama ternario de composición maceral.

2.6 MICROLITOTIPOS

Se le define a las distintas asociaciones macerales observables al microscopio, con la ayuda de una placa denominada “Retícula de Kotter” que cuenta con 20 puntos de intersección. Se subdividen en tres grupos dependiendo de los grupos macerales predominantes en la asociación (Tabla 7).

El Comité Internacional para la Petrología del Carbón (ICCP) se llegó a dos acuerdos o normas para la definición de microlitotipos:

- Cada microlitotipo se debe identificar como tal sólo si su anchura es de, al menos, 50 μm . El análisis se realiza con la retícula Kotter.
- El segundo acuerdo, llamado “la regla del 5%”, se refiere a que un grupo de microlitotipo monomaceral o bimaceral puede contener algunos macerales que no caracterizan o son típicos del monomaceral o del bimaceral, es decir, puede contener hasta un 5% de macerales que no se incluya en la definición.

En los microlitotipos se distinguen también los casos en los que los componentes inorgánicos (minerales) son abundantes o significativos entre los macerales. Estos grupos de microlitotipos, donde son importantes los componentes inorgánicos, toman el nombre genérico de: carbomineritas, o en el caso de realizar la lectura el 95% corresponde a componentes inorgánicos se denomina Mineritas.

Tabla 7. Clasificación de Microlitotipos. Tomado de ICCP (1971,1985)

TABLA MICROLITOTIPOS		
GRUPO MICROLITOTIPO	MICROLITOTIPO	COMPOSICIÓN GR MACERAL
MONOMACERAL	Vitrita	Vitrinita
	Inertita	Inertinita
	Liptita	Liptinita
BIMACERAL	Clarita	V+L \geq 95%
	Vitrinertita	V+I \geq 95%
	Durita	I+L \geq 95%
TRIMACERAL	Duroclarita	V > I, L > 5%
	Vitrinertoliptita	L > I, V > 5%
	Clarodurita	I > V, L > 5%
CARBOMINERITAS	Carbomineritare	

Monomaceral

Cuando el microlitotipo está formado por un único grupo de macerales con una ocurrencia mayor o igual al noventa y cinco por ciento ($\geq 95\%$). Para las muestras analizadas el monomaceral predominante es la Vitrita, y en menor proporción la Inertita que incluso en algunas muestras su contenido es poco relevante o nulo, tabla 8.

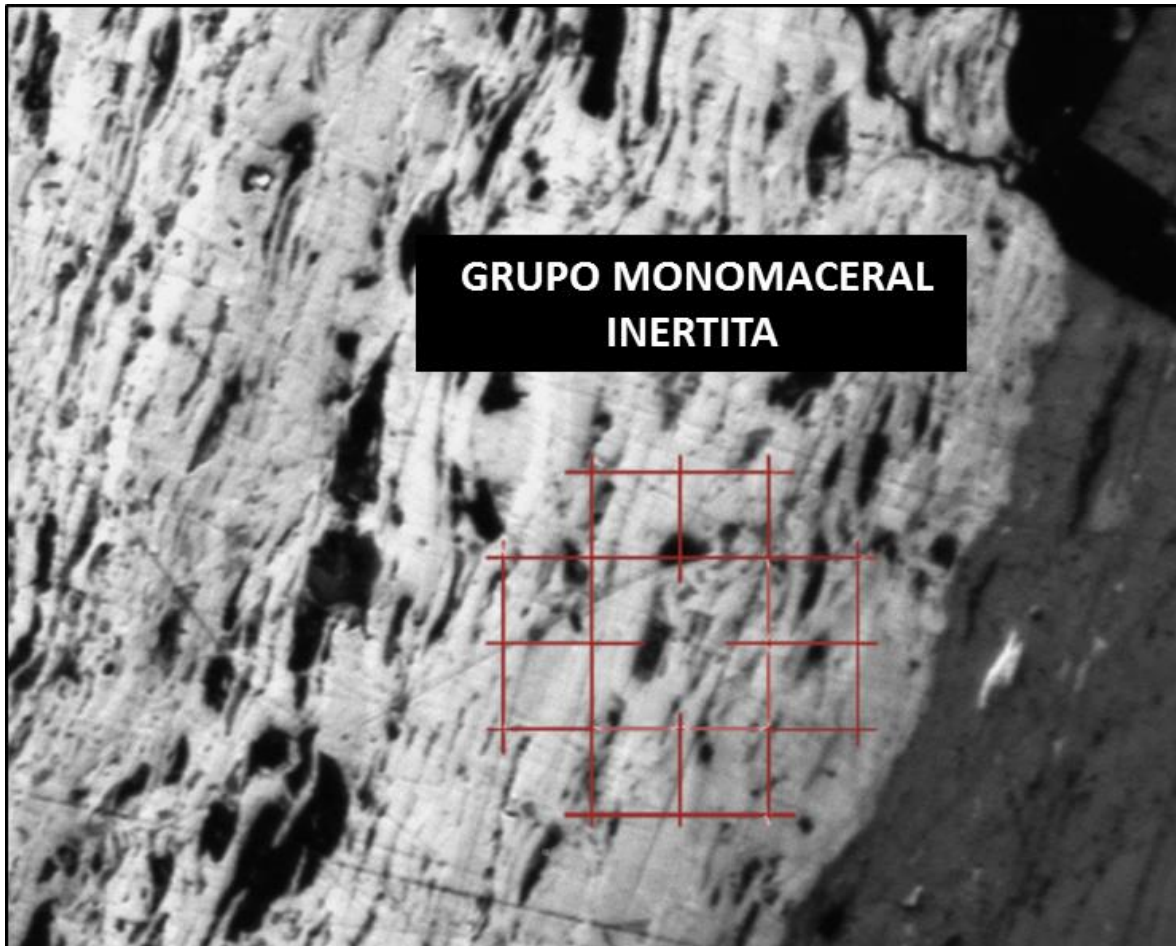


Figura 9. Grupo monomaceral del carbón (inertita). Fuente autor.

Bimaceral

Cuando el microlitotipo está formado por macerales de dos grupos distintos con una ocurrencia de cada uno de ellos mayor al cinco por ciento ($>5\%$). En este grupo se reconoce la Clarita, Vitrinertita y Durita como asociaciones macerales, predominando el bimaceral Vitrinertita (Figura 10).

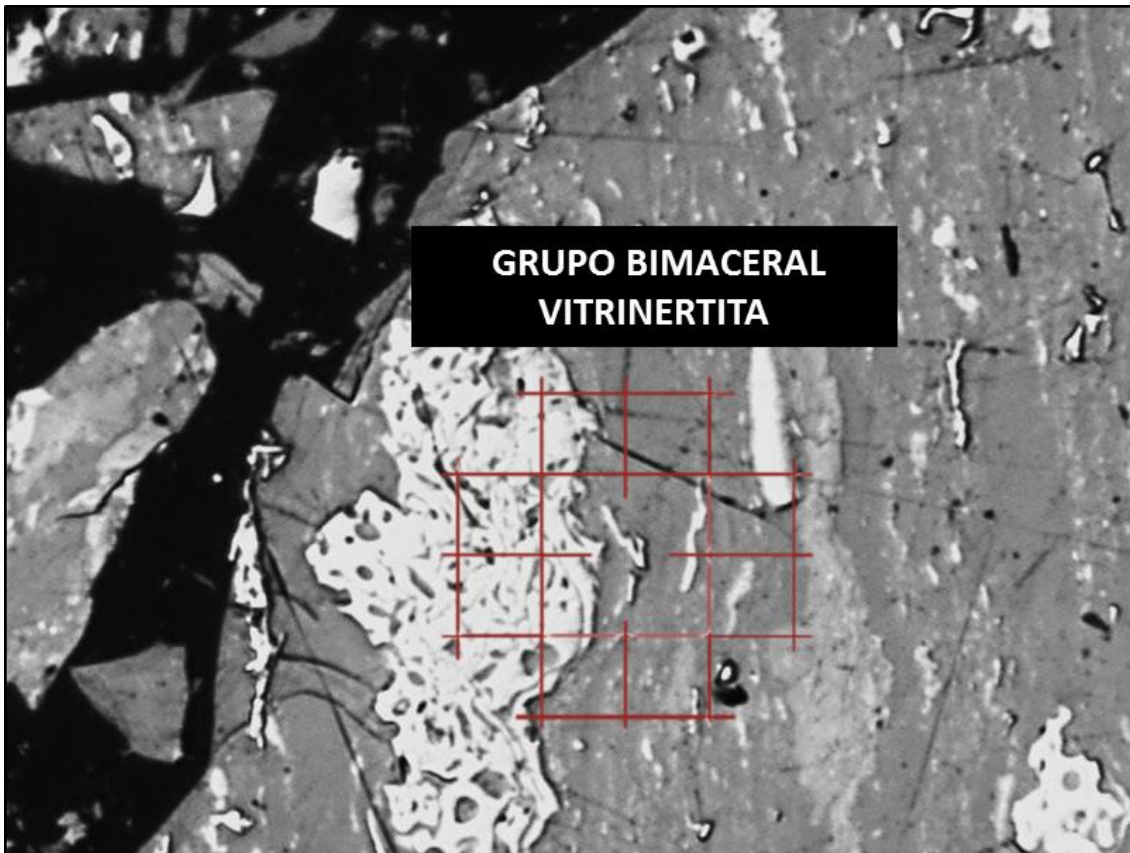


Figura 10. Grupo bimaceral, Vitrinertita. Fuente autor.

2.6.1.1

Trimaceral

Son los microlitotipos formados por macerales de los tres grupos, También son llamados trimacerita. Es la asociación menos relevante ya que se encuentra en bajas proporciones. Se reconocen los trimaceral Duroclarita, Vitrinertoliptita y Clarodurita.

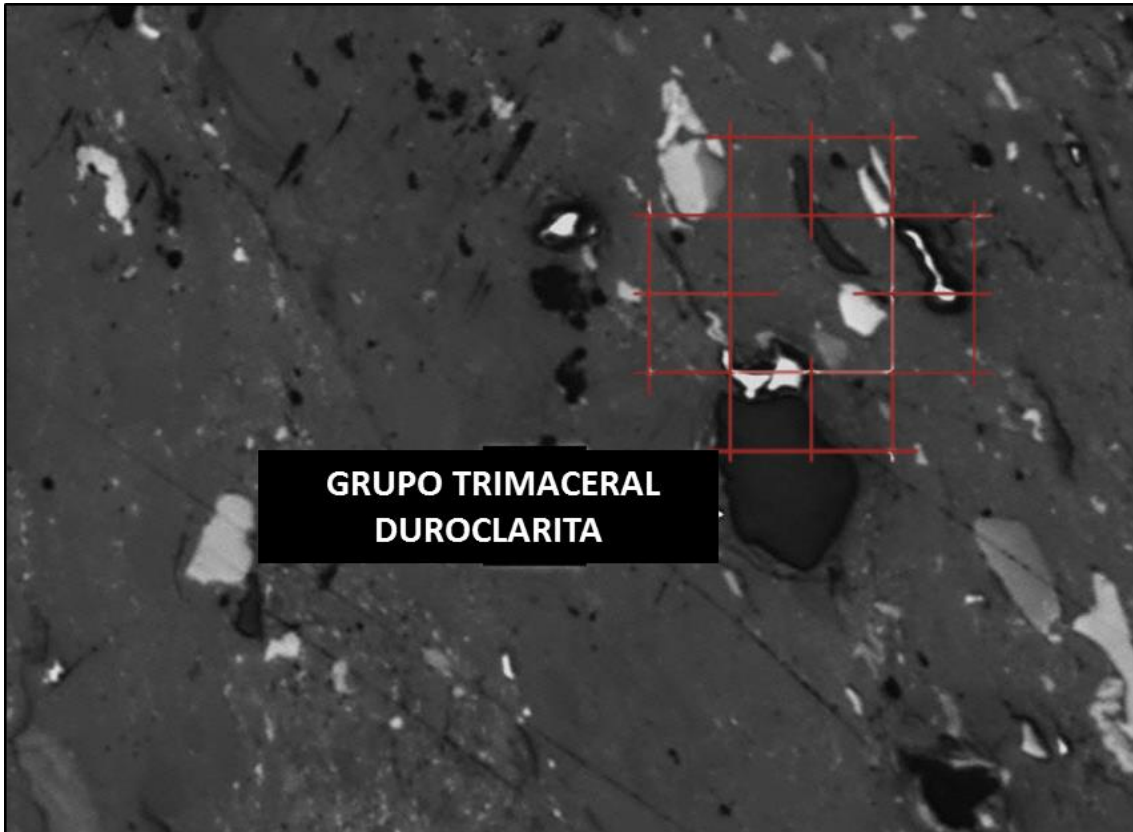


Figura 11. Grupo trimaceral, duroclarita. Fuente autor.

El análisis de microlitotipos se realizó a 12 muestras representativas a fin de determinar una posible variación del índice de molienda Hardgrove para carbones con rangos y composición maceral similar y concluir si los microlitotipos (agrupaciones macerales) pueden influir en la molturabilidad debido a las diferentes asociaciones orgánicas posibles encontradas en el carbón.

Los microlitotipos dominantes son la Vitrita con un valor mínimo de 43.6% y máximo de 66.2% perteneciente al grupo monomaceral, seguido de la Vitrinertita con porcentaje mínimo de 16.2% y máximo de 43.8% del grupo bimaceral, el microlitotipo predominante del grupo trimaceral es la duroclarita, este grupo se caracteriza por tener los porcentajes más bajos e incluso nulos, es posible apreciar con más detalle los resultados en la (Tabla 8).

Tabla 8. Asociación maceral bloques Sutatausa, Guachetá y Samacá.

ID	BLOQUE	MANTO	MONOMACERAL			BIMACERAL			TRIMACERAL			
			Vit	Iner	Lipt	Clar	Vitr	Durit	Duroc	Vitrin	Clarod	Carb
1941	Sutatausa	Gemela inferior, m-4	43,6	0	8,2	4	34,6	1,8	3,8	0,2	1	2,8
1945	Sutatausa	Manto primera (veta Primera)	45,2	0,2	3,6	1,6	43,8	3,6	1,6	0	0	0,4
1949	Sutatausa	La quinta	54	0	7,2	4,4	28,6	0,8	2,8	0,6	0,6	1
1953	Sutatausa	Chica 2	53,6	0,2	4,4	8,4	25	1	5,4	0,8	1	0,2
1996	Guachetá	Cisquera nivel 180	66,2	0,4	3	2,8	24	1,6	1,4	0	0,2	0,4
2001	Guachetá	Milagros	70	0	3,4	6,2	16,2	1,6	0	0	0,2	2,4
2004	Guachetá	Piedro	57,8	0	6,6	0,8	27,2	3,8	0	0	0	3,8
2079	Samacá	La tercera (superior del sinclinal)	52,8	0	4,6	4,8	32	0,8	1,8	0	0,4	2,8
2080	Samacá	La tercera (inferior de un sinclinal)	44,6	0	5,4	5,8	32,4	3,2	4,2	0,2	0,4	3,8
2096	Samacá	Rubí inferior	52	0	4,2	3,2	34,6	0,6	1	0	0,2	4,2
2141	Samacá	Tesoro	61	0	0,6	12,6	18,2	0,4	1	0	0	6,2
2143	Samacá	Siete bancos	56,4	0,2	6,4	2,2	23	1,8	0,2	0,4	0,4	9

MONOMACERAL

Vit: Vitrita
Iner: Inertita
Lipt: Liptinita

BIMACEERAL

Clar: Clarita
Vitr: Vitrinertinia
Durit: Durita

TRIMACERAL

Duroc: Duroclarita
Vitrin: Vitrinertoliptita
Clarod: clarodurita
Carb: carbominerita

2.7 RANGO DEL CARBÓN

Para la determinación del rango del carbón, existen dos ensayos que lo definen, el primero es el de reflectancia media aleatoria de la vitrinita utilizado en la clasificación ISO 11760, y el segundo es el de materia volátil en base seca libre de materia mineral (bslmm) el cual es usado en la Clasificación ASTM D388-13. Por lo tanto estos dos parámetros presentan una relación lineal e inversamente proporcional, sugiriendo que el incremento en el rango del carbón conlleva a una disminución de la materia volátil, y un incremento de la reflectancia media aleatoria de la vitrinita, lo cual permite a su vez realizar un control de calidad (figura 12).

Para el análisis de los datos, se establecieron tres bloques de estudio en los cuales fueron muestreados los diferentes mantos (Sutatausa, Guachetá y Samacá) encontrándose que los carbones de menor rango se encuentran ubicados hacia el sur de la estructura donde están presentes.

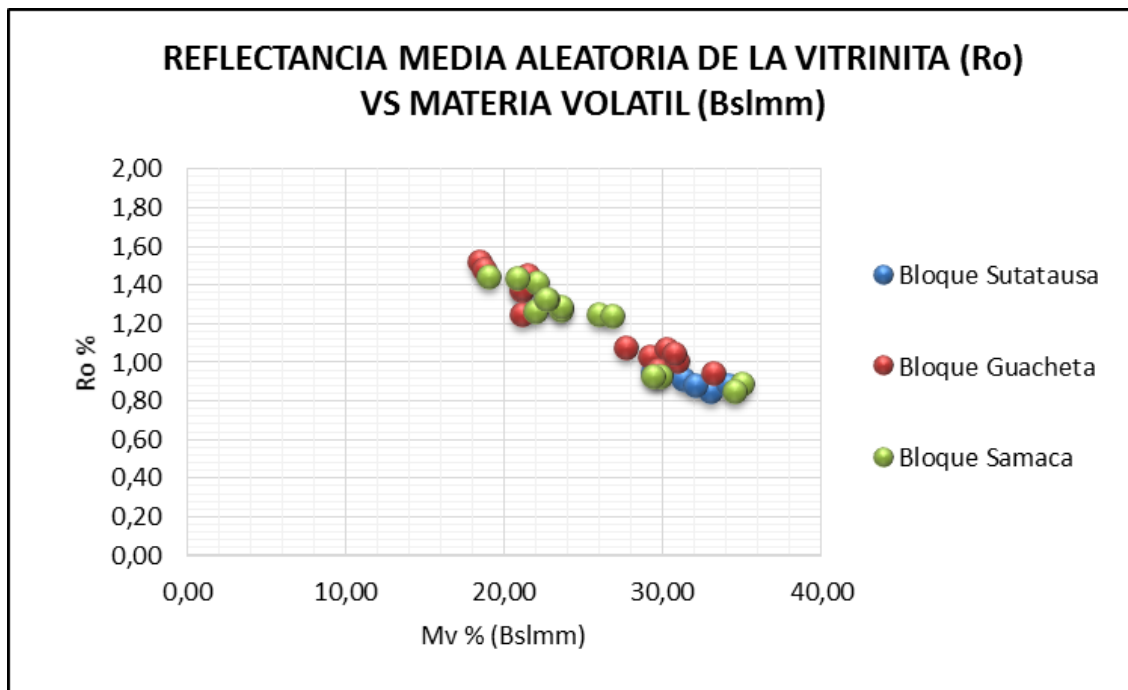


Figura 12. Relación entre la materia volátil y la reflectancia media de la vitrinita.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS PRELIMINAR

Basados en los resultados obtenidos se ha establecido una fuerte relación de la molturabilidad (HGI) con los parámetros que influyen en la determinación del rango del carbón. Cuanto mayor sea el rango el Índice de Molienda Hardgrove incrementa, según las clasificaciones ASTM-D388-13 e ISO-11760, que fueron utilizadas en este estudio (Tabla 9) (Figura 13).

Para la clasificación ASTM-D388-13, representada con las tonalidades de gris, los carbones bituminosos bajos volátiles tienen índices de molturabilidad superiores a los 100, para medios volátiles de 70 a 100 y altos volátiles índices inferiores a 70 (figura 13).

Si se utiliza la clasificación ISO-11760, de tonalidades azules, el índice de molienda hardgrove para los carbones bituminosos A arroja índices superiores a 110, para bituminosos B entre 80 y 110 y para bituminosos C inferiores a 80 (figura 13).

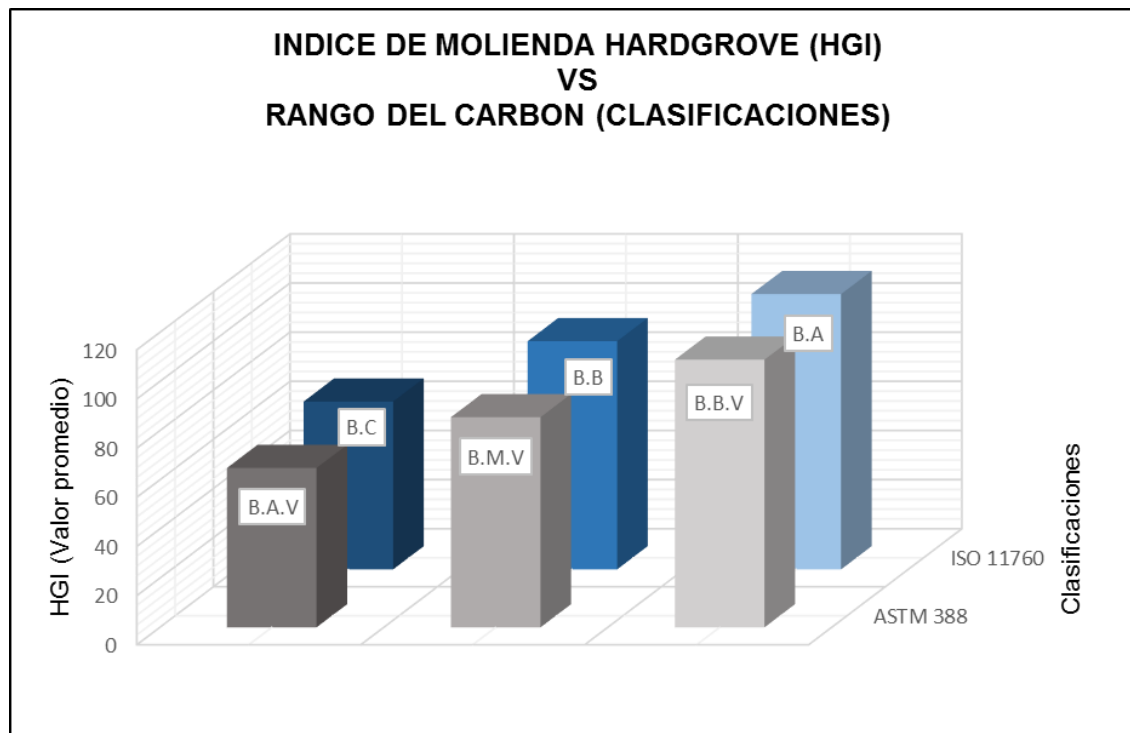


Figura 13. Variación de HGI con el rango.

Tabla 9. Clasificación de los carbones estudiados, organizados por rango en orden ascendente.

COD.- EXTERN O-	MATERIA- VOLATIL- (bslmm)- (%)	Ro-media	CLASIF.- ASTM- D388-113	CLASIF.- ISO- 11760	HGI
1949	32.96	0.85	BAV	BC	61
1952	32.06	0.88	BAV	BC	58
1953	34.11	0.89	BAV	BC	74
2012	33.15	0.94	BAV	BC	65
2079	34.99	0.89	BAV	BC	70
2080	34.51	0.85	BAV	BC	61
2008	29.67	0.96	BMV	BC	68
2082	29.85	0.93	BMV	BC	73
2143	29.34	0.93	BMV	BC	76
1941	29.34	0.95	BMV	BC	75
1945	29.81	0.95	BMV	BC	70
1993	29.15	1.03	BMV	BB	86
1994	30.94	1.06	BMV	BB	83
1996	30.25	1.07	BMV	BB	79
2009	30.85	1.01	BMV	BB	75
2010	27.70	1.08	BMV	BB	90
2011	30.70	1.05	BMV	BB	81
2089	23.57	1.27	BMV	BB	97
2090	23.53	1.29	BMV	BB	99
2094	22.71	1.33	BMV	BB	99
2141	25.96	1.25	BMV	BB	96
2142	22.60	1.33	BMV	BB	108
2144	26.78	1.24	BMV	BB	85
2083	22.01	1.41	BMV	BA	99
2003	21.07	1.38	BBV	BB	103
2004	21.11	1.25	BBV	BB	114
2007	21.05	1.39	BBV	BB	98
2140	21.95	1.27	BBV	BB	92
1997	18.45	1.53	BBV	BA	120
2001	21.47	1.45	BBV	BA	121
2002	18.74	1.48	BBV	BA	121
2093	20.76	1.44	BBV	BA	99
2096	18.96	1.45	BBV	BA	112

3.2 CORRELACIÓN DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS CON EL HGI

3.2.1 Análisis próximos + Azufre + FSI vs HGI

Para la determinación del HGI a partir de los análisis próximos, se tendrán en cuenta los valores en base como se determinan a fin de poder relacionar la influencia de cada uno de los parámetros en la variación de la molturabilidad (Índice molienda Hardgrove). En cuanto al azufre este se presentara en base seca debido a que para los carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque el contenido de este elemento es muy bajo y pequeñas variaciones en la humedad pueden alterar los resultados.

Para establecer la incidencia de las propiedades del carbón con el HGI se debe tener en cuenta el grado de relación existente entre las dos variables y en qué medida se relacionan, esto se logra a través de la correlación de Pearson que varía entre los límites de -1 y +1. Las variables analizadas indican una que la materia volátil en comparación con el HGI presenta una muy alta correlación negativa, contrario a lo que presenta el índice de hinchamiento libre del carbón (FSI) con el HGI, que presenta una correlación negativa muy baja (Tabla 10).

Tabla 10. Coeficientes de correlación de Pearson, análisis próximos más azufre e hinchamiento.

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA ANÁLISIS PRÓXIMOS, AZUFRE Y FSI VS HGI									
	Hr	Cz	MV	CF	CF(Bslmm)%	MV (bslmm)%	FSI	Azt (bs)%	HGI
Hr	1								
Cz	-0,0591	1							
MV	0,4481	-0,0160	1						
CF	-0,3958	-0,4953	-0,8596	1					
CF(Bslmm)%	-0,4599	-0,1249	-0,9857	0,9203	1				
MV(Bslmm)%	0,4599	0,1249	0,9857	-0,9203	-1	1			
FSI	-0,1335	0,1654	0,1822	-0,2327	-0,2123	0,2123	1		
Azt (Bs)%	0,0846	0,4309	0,4104	-0,5721	-0,4286	0,4286	0,0906	1	
HGI	-0,5069	-0,1571	-0,9087	0,8737	0,9242	-0,9242	-0,1646	-0,4013	1

HR: humedad residual

Cz: cenizas

MV: materia volátil

CF: carbono fío

FSI: índice de hinchamiento libre

Azt: azufre

HGI: índice de molienda hardgrove

Bs: base seca

Bslmm: base seca libre de materia mineral

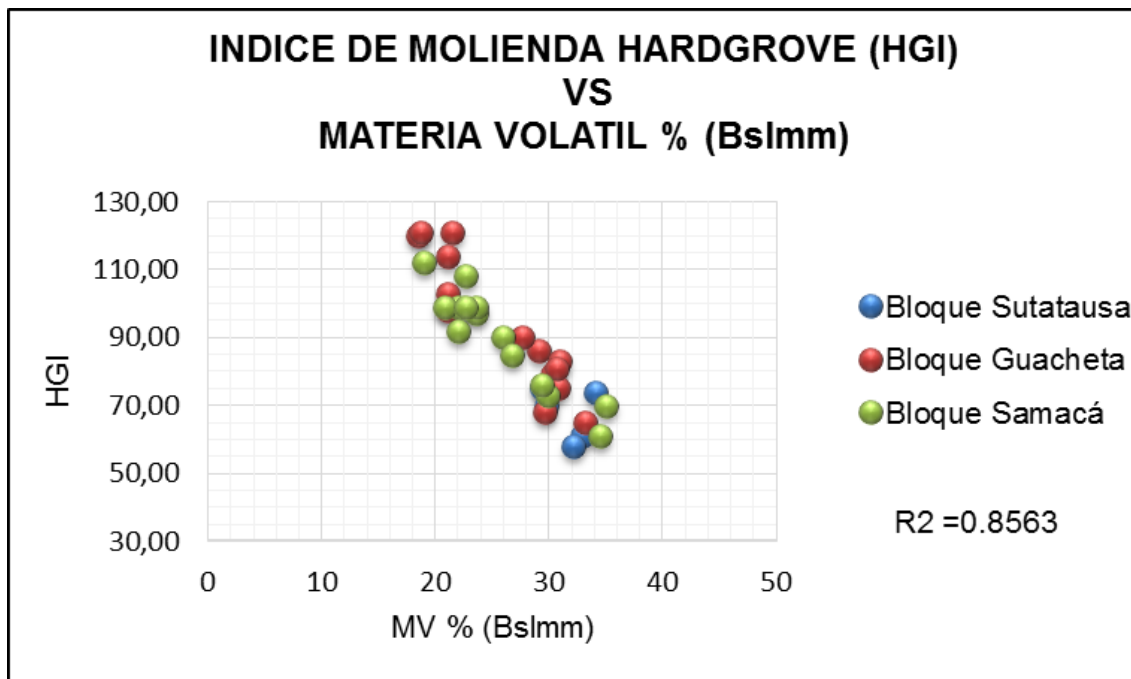
Valor

Significado

-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Materia Volátil vs HGI

De acuerdo a diferentes estudios realizados acerca de la variación del índice de molienda Hardgrove (HGI), se ha encontrado que la molturabilidad del carbón depende en gran medida del rango. Existe una relación inversa entre la materia volátil y el HGI para carbones de rango bituminosos, sugiriendo que con el incremento del rango la resistencia disminuye. El coeficiente de determinación (R^2), explica que la materia volátil en un 85,6% determina la variabilidad de la molturabilidad, siendo la propiedad que más se correlaciona con el HGI y la que posiblemente le pueda aportar significativamente al sistema de ecuación predictor (Figura 14).



Carbono fijo vs HGI

Con el incremento del contenido de carbono fijo, se evidencia un aumento del valor de HGI, existe una relación directamente proporcional entre estas dos variables indicando que los carbones más friables (HGI mas alto) son más ricos en el elemento carbono resistente a los procesos de volatilización. El coeficiente de determinación $R^2=0.7702$ indica la dependencia del HGI con respecto al carbono fijo en base como se determina.

Este parámetro presenta una alta correlación positiva con el HGI, pero no será tenido en cuenta ya que el software IBM SPSS Statistics impide que haya una colinealidad entre las variables predictoras, y el valor de carbono fijo depende directamente de variables como la materia volátil, cenizas y humedad.

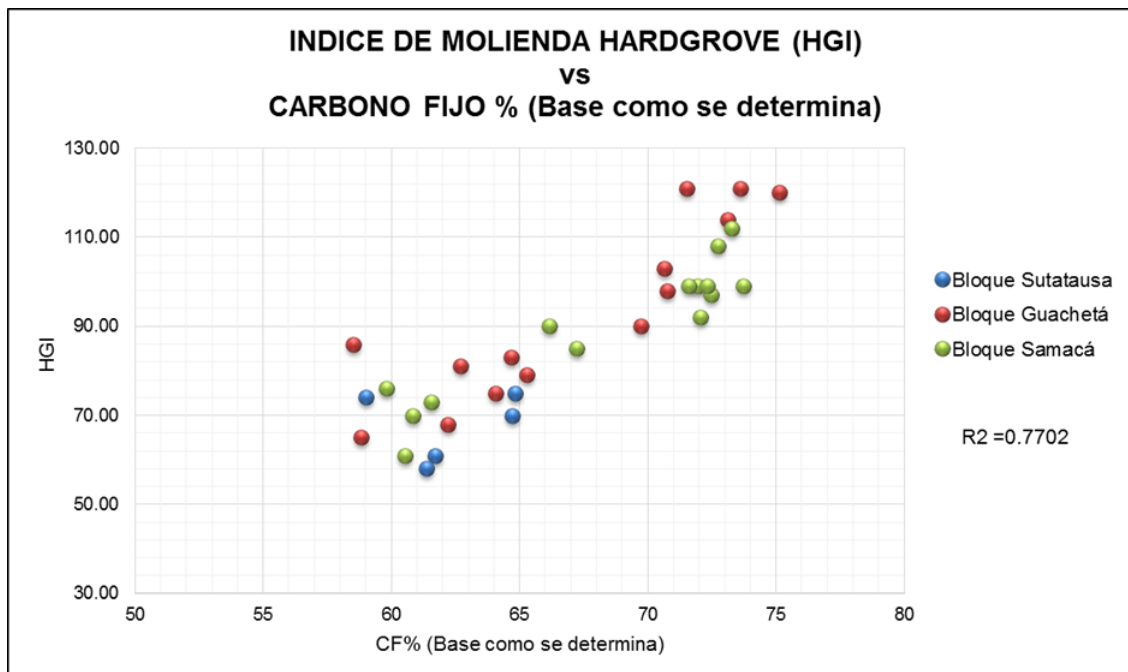


Figura 15. Relación entre el HGI y el Carbono fijo.

Cenizas vs HGI

Al correlacionar el contenido de cenizas del carbón con el HGI la dispersión de puntos no tiene una disposición preferencial que explique una dependencia de las variables, indicado por el coeficiente de determinación $R^2=0.0269$ (Figura 16). Pero no se descarta que algunas variaciones del Índice de Molienda Hardgrove tengan relación con el incremento de las cenizas, se han observado casos preferencialmente en carbones de bajo rango, que altos contenidos de cenizas inducen a un índice alto de HGI, la explicación a este posible comportamiento es que los componentes inorgánicos presentan bajos contenidos de cuarzo y sulfuros en el caso de la pirita y altos contenidos de minerales arcillosos y ferruginosos.

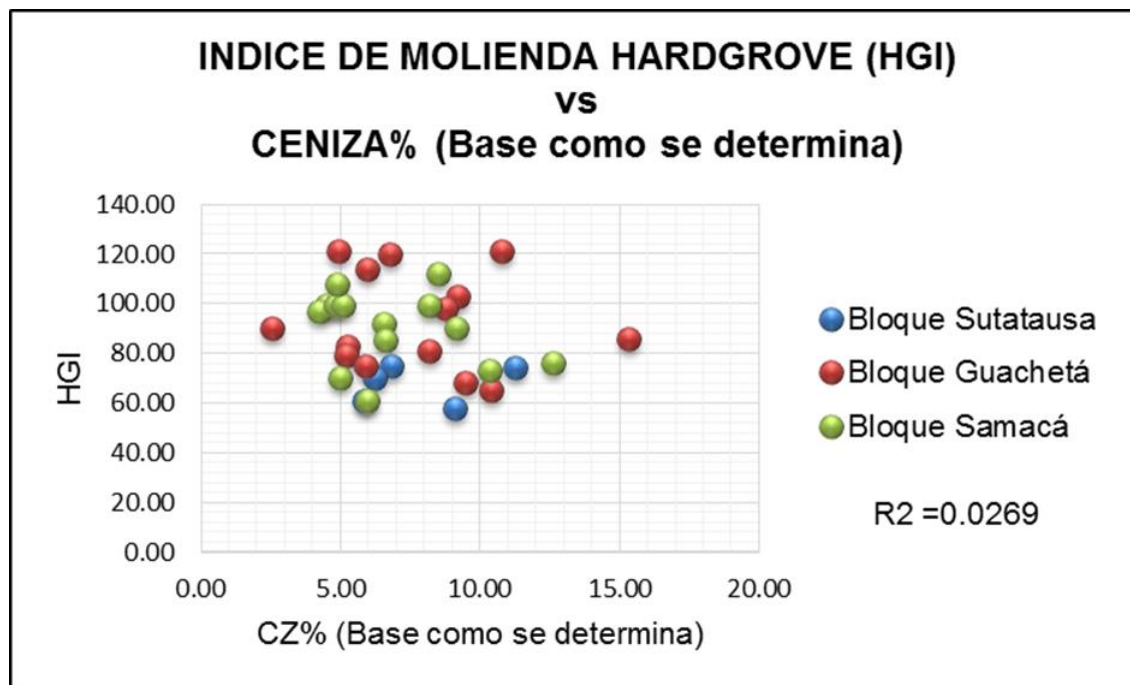


Figura 16. Relación entre el HGI y Cenizas.

Humedad residual vs HGI

La humedad es un parámetro que debe ser evaluado para determinar variaciones del HGI en los carbones, para ello se decidió trabajar con la humedad residual o intrínseca debido a que el análisis Hardgrove se realiza con material previamente secado al aire, es importante la buena ejecución del proceso ya que valores herrados de esta propiedad pueden causar aglomeración de las partículas de carbón y por ende resultados anómalos de HGI.

La dispersión en los valores de HGI con respecto a los de humedad evidencia que existe una correlación negativa moderada entre estos parámetros, donde el 25,7% de esta variable influye en la predicción del HGI, con tendencia a influenciar en los carbones de menor rango presentes en el estudio como bituminosos altos volátiles y algunos medios volátiles.

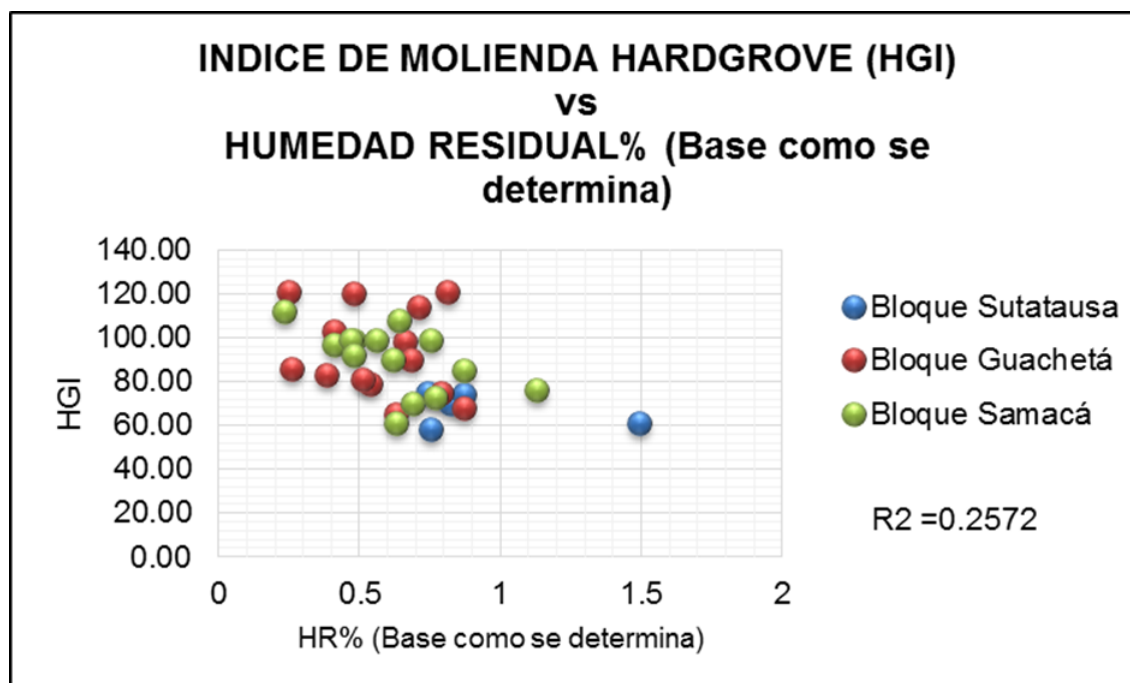


Figura 17. Relación entre el HGI y la Humedad.

Azufre vs HGI

La dispersión de puntos explica una correlación negativa moderada de las variables, pero los datos no se han podido ajustar a una posible tendencia lineal ya que los valores de azufre encontrados son bajos e impredecibles al establecer un análisis multivariado, el azufre es también considerado como un constituyente de la fracción inorgánica considerada en este estudio como poco relevante.

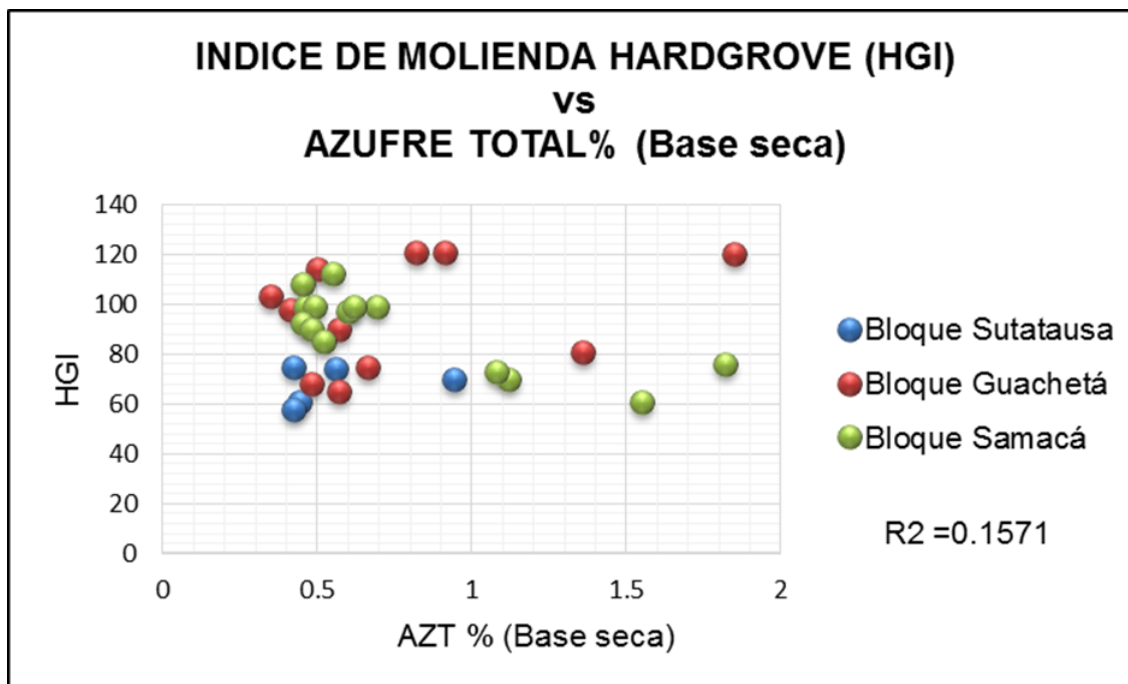


Figura 18. Relación entre el HGI y azufre.

FSI vs HGI

El índice de hinchamiento libre carbón presenta una muy baja correlación negativa con el HGI ya que es un indicador del carbón cuando se calienta, haciendo referencia a las características de carbonización, por tal motivo además de su baja correlación este parámetro no será tomado en cuenta.

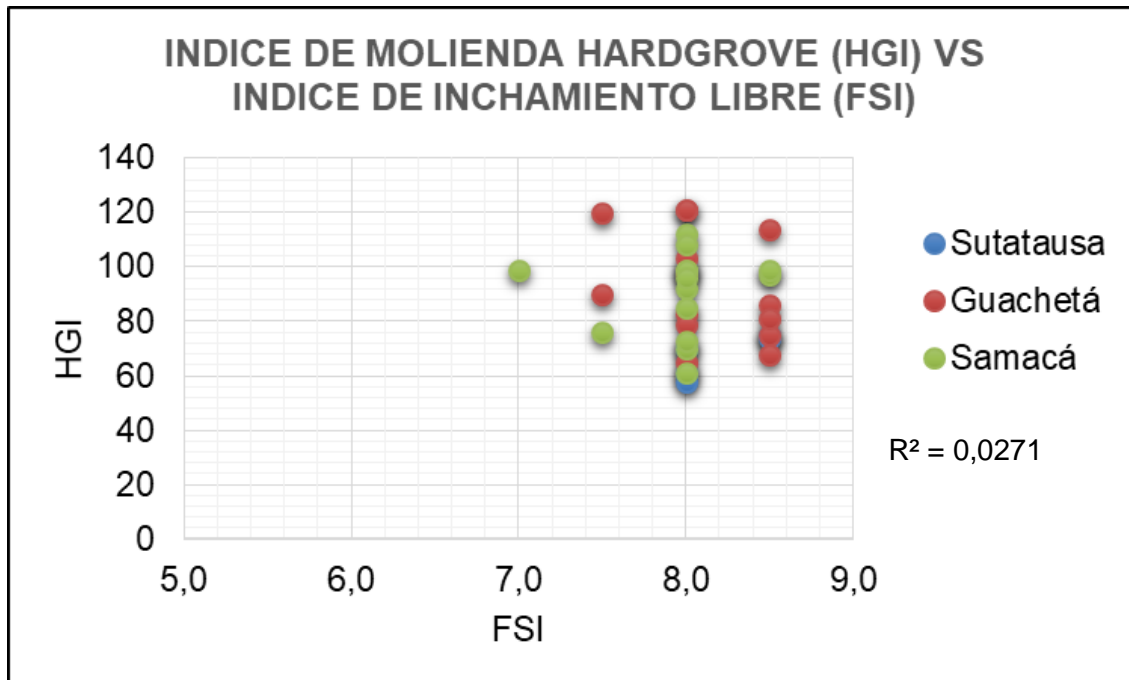


Figura 19. Relación entre el HGI y FSI.

3.3 CORRELACIÓN DE LOS ANÁLISIS PETROGRÁFICOS CON EL HGI

3.3.1 Reflectancia media aleatoria de la vitrinita vs HGI.

Al correlacionar la Reflectancia Media Aleatoria de la Vitrinita con el HGI, se determinó que estos dos presentan una relación directamente proporcional, es decir a menor valor de reflectancia menor valor de HGI, lo cual indica que los carbones de más bajo rango en este intervalo presentaran mayor resistencia a ser triturados (figura 20).

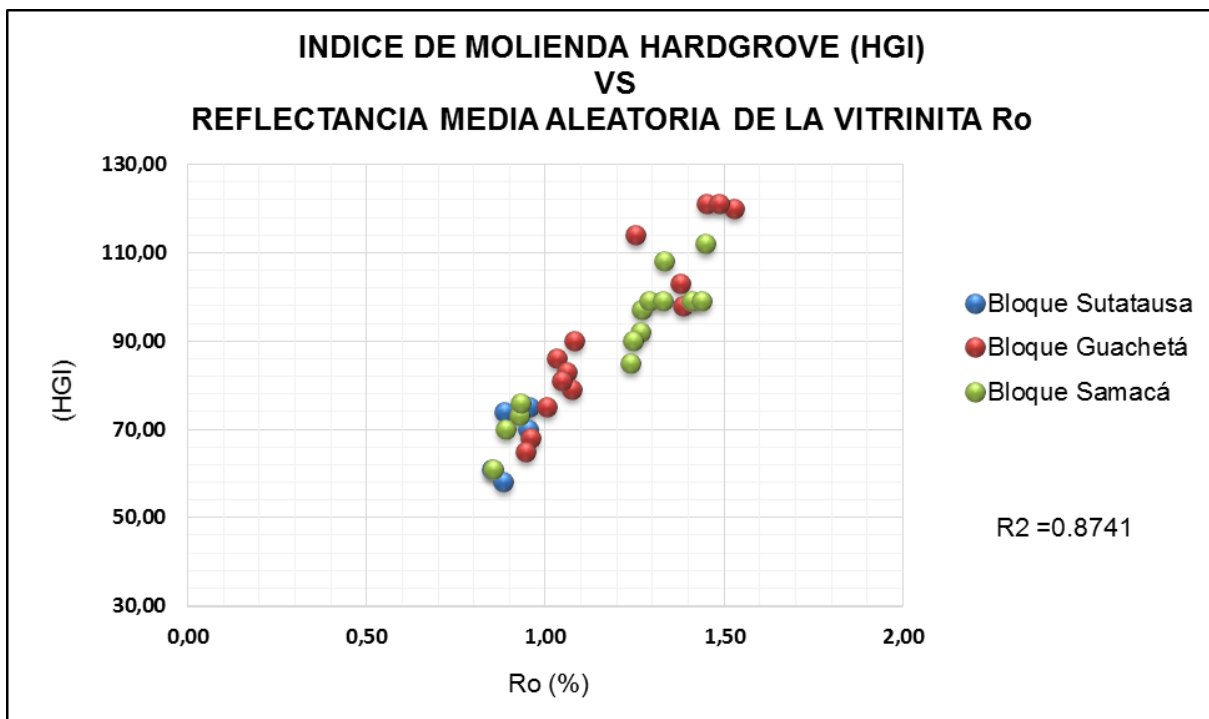


Figura 20. Relación entre el HGI y la reflectancia media aleatoria de la vitrinita.

3.3.2 Conteo maceral vs HGI.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la petrografía del carbón, se determinó que para la población estudiada, el único grupo maceral que presenta relación con el HGI (Molturabilidad) es el de la Liptinita con un coeficiente de correlación de -0.7387, indicando una alta correlación inversa. La proporción de los otros dos grupos maceral al ser muy variada no mostró cambios significativos con el HGI (Tabla 11) (Figuras 21 y 22).

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson, composición maceral.

COEFICIENTES DE CORRELACION DE PEARSON PARA COMPOSICION MACERAL VS HGI					
	VITRINITA %	LIPTINITA %	INERTINITA %	M. MINERAL %	HGI
VITRINITA %	1				
LIPTINITA %	-0,17216516	1			
INERTINITA %	-0,79427966	-0,18132514	1		
M. MINERAL %	-0,00645985	0,02158661	-0,51610336	1	
HGI	0,23224644	-0,73872831	-0,02236409	0,11378697	1

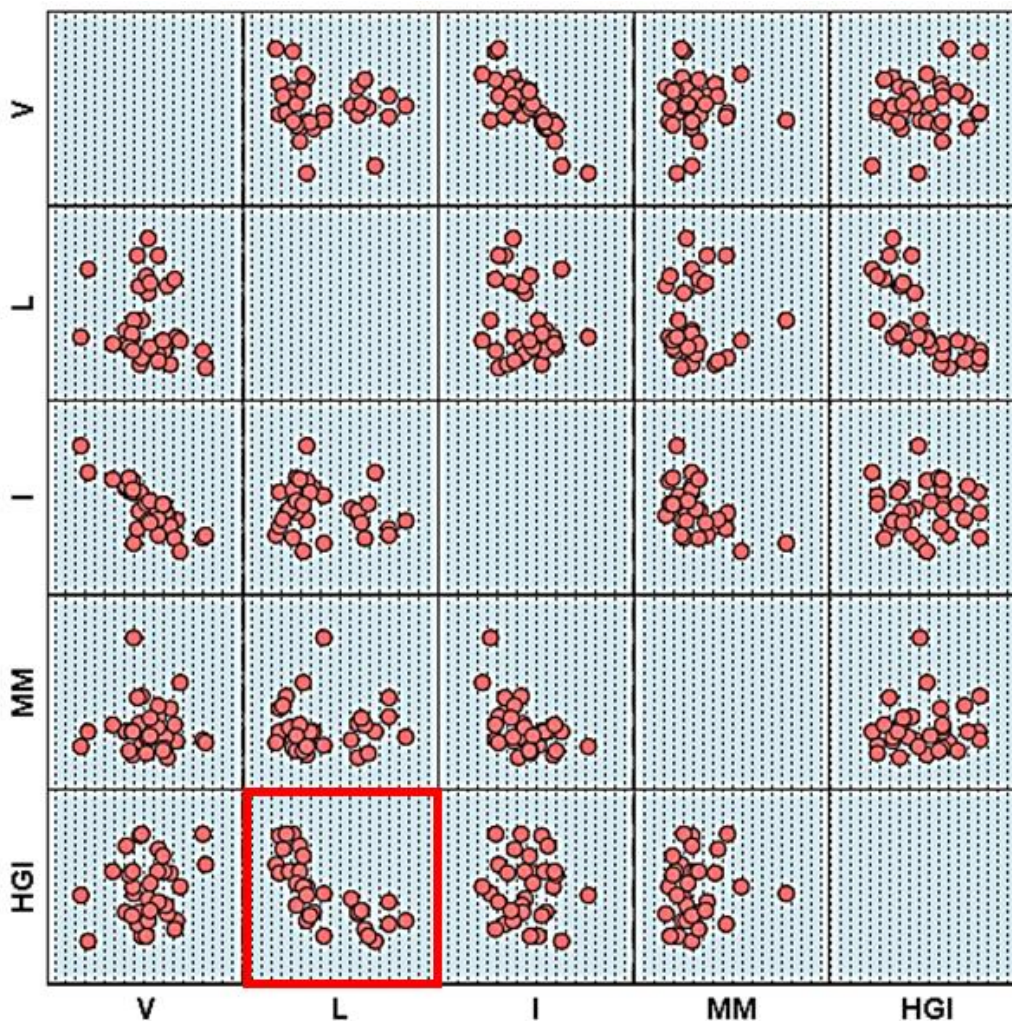


Figura 21. Diagrama de dispersión matricial para conteo maceral.

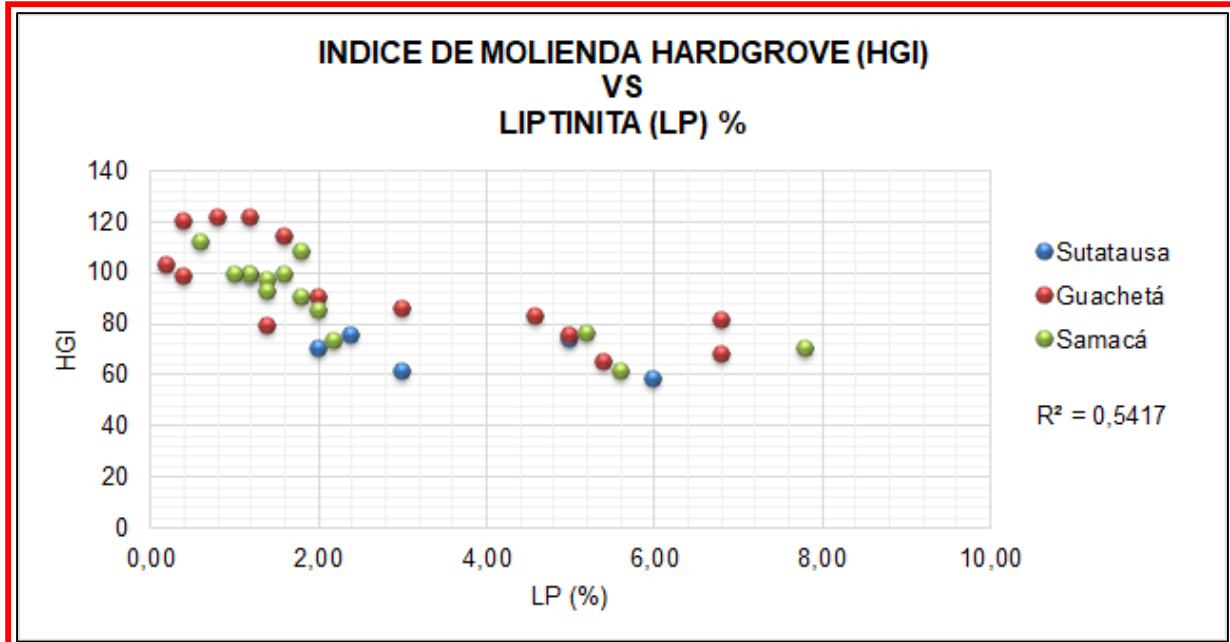


Figura 22. Relación entre el HGI y el grupo maceral Liptinita.

3.3.3 Conteo microlitotipos vs HGI.

El conteo de microlitotipos mostro una tendencia del grupo monomaceral vitrita, seguido por el bimaceral vitrinertita. De acuerdo a los coeficientes de correlación es evidente que la asociación maceral no es un factor determinante en la molturabilidad del carbón. Sin embargo el microlitotipo del grupo trimaceral duroclarita tiene un coeficiente de correlación de -0,6536 (Tabla 13), razón por la cual puede ser usada para la predicción del HGI.

Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson, conteo Microlitotipos.

COEFICIENTES DE CORRELACION DE PEARSON PARA ANALISIS MICROLITOTIPOS VS HGI											
	VIT	INERT	LIPT	CLAR	VITROI	DURITA	DUROC	VITRIN	CLARO	CARB	HGI
VITRITA	1										
INERTITA	0,2272	1									
LIPTITA	-0,4840	-0,2336	1								
CLARITA	0,2050	-0,2445	-0,5611	1							
VITROINERTITA	-0,8420	-0,0299	0,3335	-0,5103	1						
DURITA	-0,3038	0,0980	0,2811	-0,5616	0,3984	1					
DUROCLARITA	-0,5812	0,0258	0,2644	0,2977	0,2993	-0,0824	1				
VITRINERTOLIPTITA	-0,2003	0,1397	0,4026	0,1805	-0,1066	-0,2377	0,6422	1			
CLARODURITA	-0,3852	-0,0130	0,5554	0,1412	0,0726	-0,2953	0,7879	0,7474	1		
CARBOMINERITA	0,0599	-0,2618	0,0280	0,0927	-0,3132	-0,0814	-0,4486	-0,1396	-0,2320	1	
HGI	0,5777	-0,2728	-0,2971	0,0180	-0,4201	-0,0334	-0,6536	-0,4924	-0,4813	0,2233	1

Vitri: Vitrita
 Iner: Inertita
 Lipt: Liptinita
 Clar: Clarita
 Vitri: Vitroinertitnita
 Durit: Durita
 Vitrin: Vitrinertoliptita
 Clarod: clarodurita
 Carb: Carbominerita

Valor	Significado
-1	Correlación negativa perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva perfecta

3.4 ANÁLISIS DE REGRESION MULTIPLE

Este método estadístico permite determinar la contribución de varios factores en la predicción de un resultado, el objetivo a desarrollar con el análisis multivariado es que a partir de variables explicativas como los parámetros fisicoquímicos y petrográficos, establecer un modelo matemático a través del cual se pueda determinar el Índice de Molienda Hardgrove.

Para generar el modelo predictor del HGI se implementó el uso del software IBM SPSS Statistics, que permite generar un análisis de regresión lineal múltiple con base en la ecuación de la recta, donde se ingresaron los datos obtenidos por las 33 muestras.

Para la estimación del modelo matemático se implementaron sucesivos modelos con el fin de establecer el orden de las variables, esto permitió establecer que las variables que mejor podían influenciar la determinación del HGI eran la Reflectancia Media Aleatoria de la Vitritina y la Liptinita de los parámetros petrográficos, y de los próximos la Materia Volátil.

Sin embargo para que el modelo matemático pueda ser aceptado debe cumplir con una serie de supuestos:

3.4.1 Supuesto de linealidad

Indica que todas las variables predictoras del modelo matemático deben ser linealmente dependientes bien sea directa o inversamente proporcionales. Al correlacionar las variables involucradas todas cumplen con el supuesto de linealidad (Figura 23). Además el valor de probabilidad asociado para cada uno de los coeficientes de correlación es menor de 0,05 por lo tanto se puede inferir que las correlaciones son significativas (Tabla 13).

Tabla 13. Correlación lineal de Pearson, significancia.

Correlaciones					
		HGI	RO	MVbslmm	LIPlmm
Correlación de Pearson	HGI	1,000	0,936	-0,924	-0,731
	RO	0,936	1,000	-0,959	-0,771
	MVbslmm	-0,924	-0,959	1,000	0,809
	LIPlmm	-0,731	-0,771	0,809	1,000
Sig. (unilateral)	HGI		0,000	0,000	0,000
	RO	0,000		0,000	0,000
	MVbslmm	0,000	0,000		0,000
	LIPlmm	0,000	0,000	0,000	

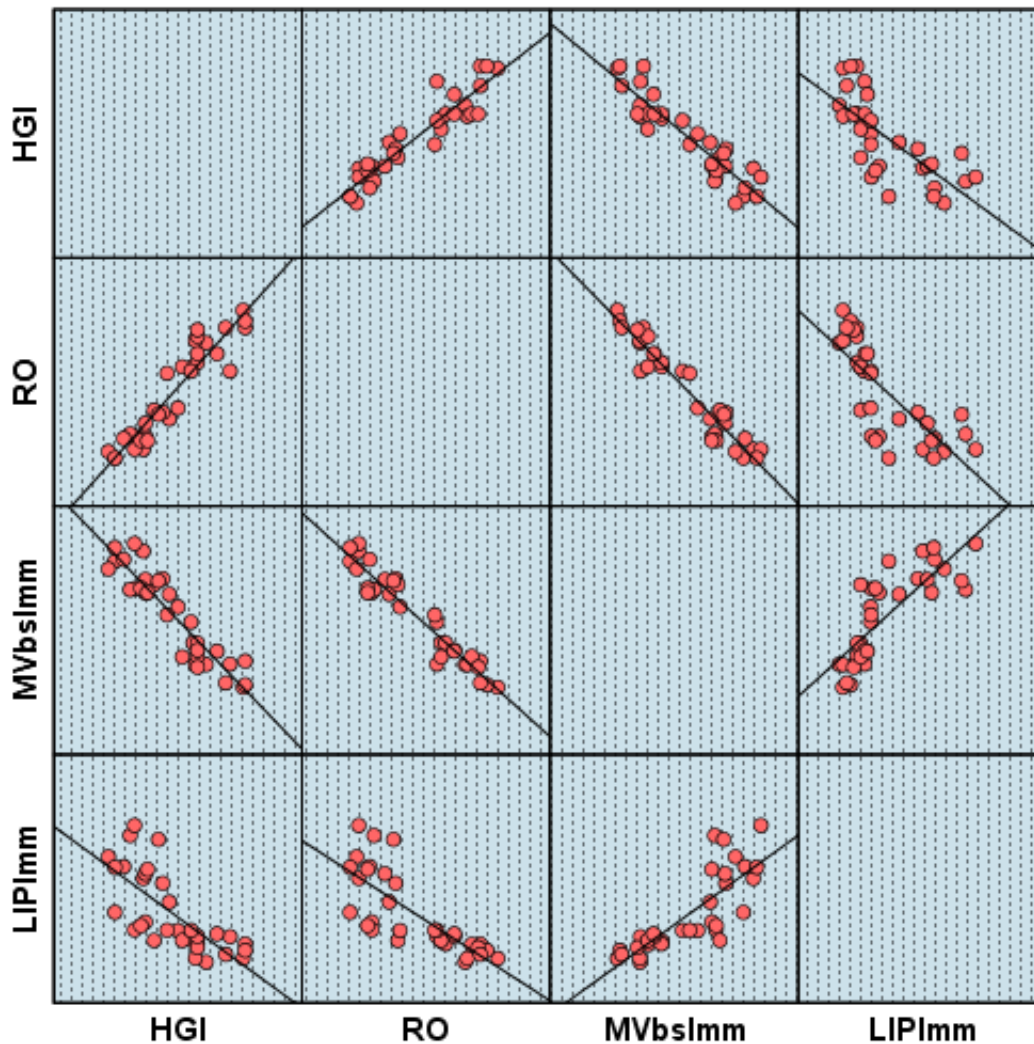


Figura 23. Diagrama de dispersión matricial para las variables predictor, software IBM SPSS Statistics.

3.4.2 Supuesto de normalidad de residuos.

Para corroborar el supuesto de normalidad se pueden realizar pruebas tanto graficas como estadísticas. Las más influyentes son las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, pero todo depende del número de datos con que se cuente, la prueba Kolmogorov-Smirnov es la prueba más usada ya que arroja valores más confiable pero muchos afirman que se debe implementar cuando se superan los 50 datos, la prueba Shapiro-Wilk es adecuada cuando se cuenta con una base de datos inferior a los 50 pero arroja un grado de incertidumbre mayor.

Métodos estadísticos.

Con el fin de determinar la normalidad de los residuos se llevaron a cabo las pruebas Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, que plantean:

- La significancia $<0,05$; se rechaza la hipótesis nula, con un 95% de confianza
- La significancia $>0,05$; se acepta la hipótesis nula, con un 95% de confianza

Para este caso el nivel de significancia es mayor de 0.05, lo cual acepta la hipótesis nula con un 95% de confianza, la distribución de la variable aleatoria es igual a la distribución normal, entonces se cumple el supuesto de normalidad (Tabla14).

Tabla 14. Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Unstandardized Residual	0,084	33	,200 [*]	0,981	33	0,805

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Métodos gráficos.

- La curva ajustada al histograma tiene un comportamiento sesgado ligeramente a la derecha indicado por la prueba de simetría con un valor de 0,189; valor que se acerca bastante a cero por lo que tiende a ser simétrica. El valor de la curtosis es de -0,434 indicando una distribución platicúrtica. En el histograma observamos que la curva de normalidad sigue una distribución normal de los residuos (figura 24).

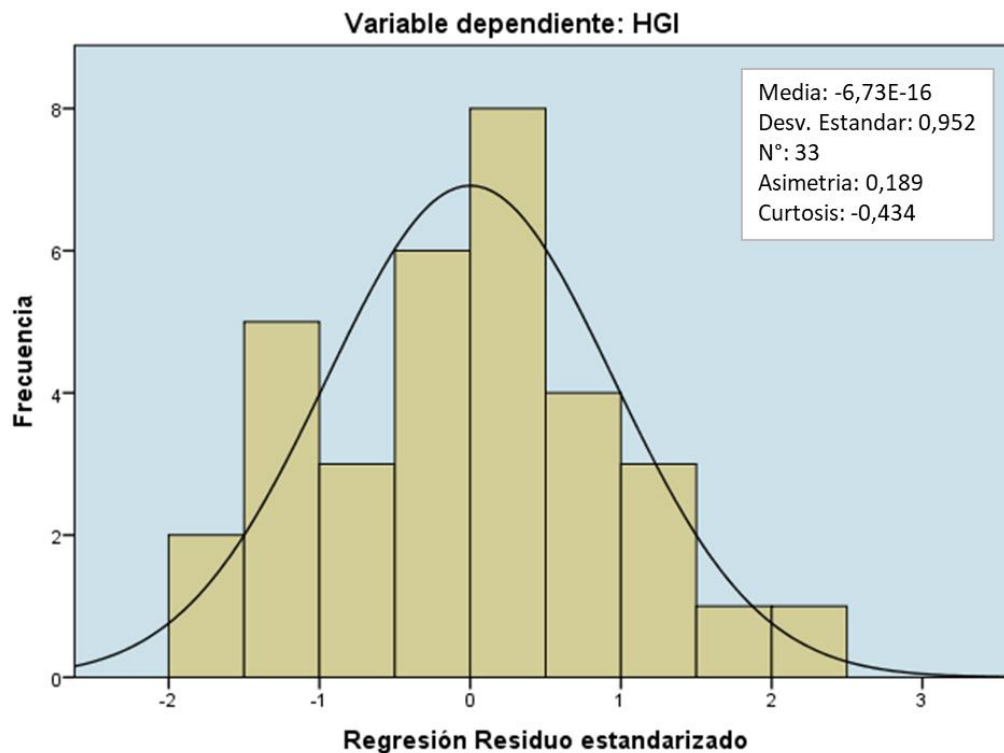


Figura 24. Histograma de normalidad, software IBM SPSS Statistics.

- El grafico P-P muestra los valores de los residuos los cuales presentan un comportamiento normal próximo a la recta, lo cual sería un indicador del supuesto de normalidad de los datos o variables involucradas (figura 25).

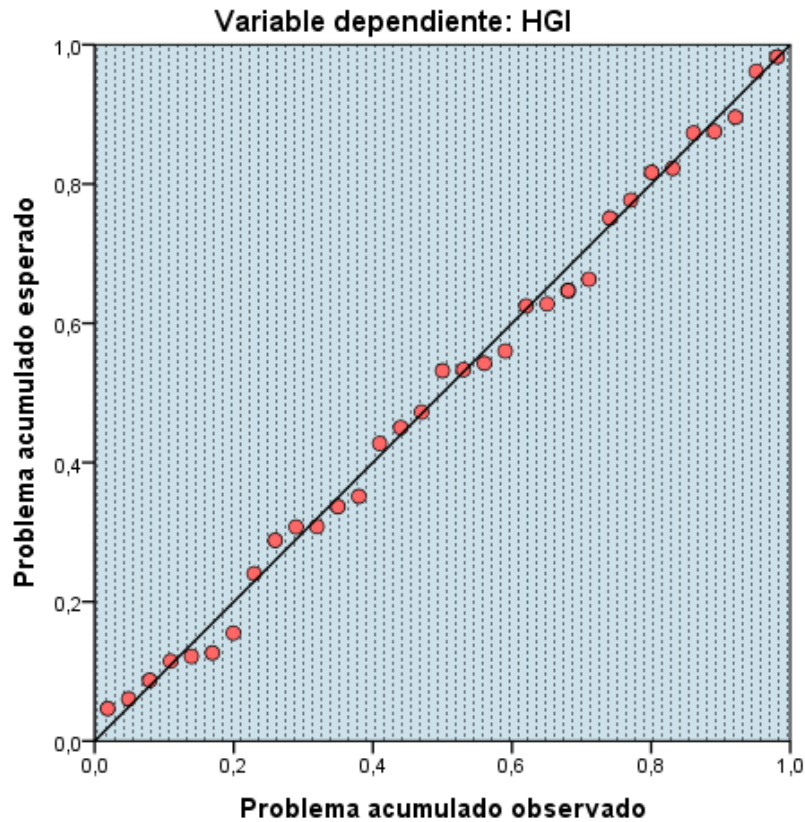


Figura 25. Grafico P-P normal de regresión de residuos estandarizados, software IBM SPSS Statistics.

3.4.3 Supuesto de independencia de residuos

El método más usado para corroborar el supuesto de independencia es el implementado por Durbin-Watson, establece valores que oscilan entre 0 y 4 indicando la independencia de los residuos cuando el valor es más cercano a 2.

Para la implementación de nuestro modelo matemático el Durbin-Watson es de 1,897, valor considerado como muy próximo a 2 estableciendo que no existe autocorrelación de los residuos viable para nuestro modelo (Tabla 15).

Tabla 15. Constante Durbin-Watson.

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,941 ^a	0,885	0,873	6,55568	1,897
a. Predictores: (Constante), LIPImm, RO, MVbslmm					
b. Variable dependiente: HGI					

3.4.4 Supuesto de homocedasticidad

Este supuesto se detecta en los gráficos de residuos estandarizados vs residuos predichos estandarizados, tiene límites de -2 a +2 donde los datos pueden oscilar, para que sea aprobada la hipótesis de homocedasticidad se debe tener indicios que me sugieran que la variabilidad es no constante y tampoco presente un patrón de ordenamiento como curvas o rectas.

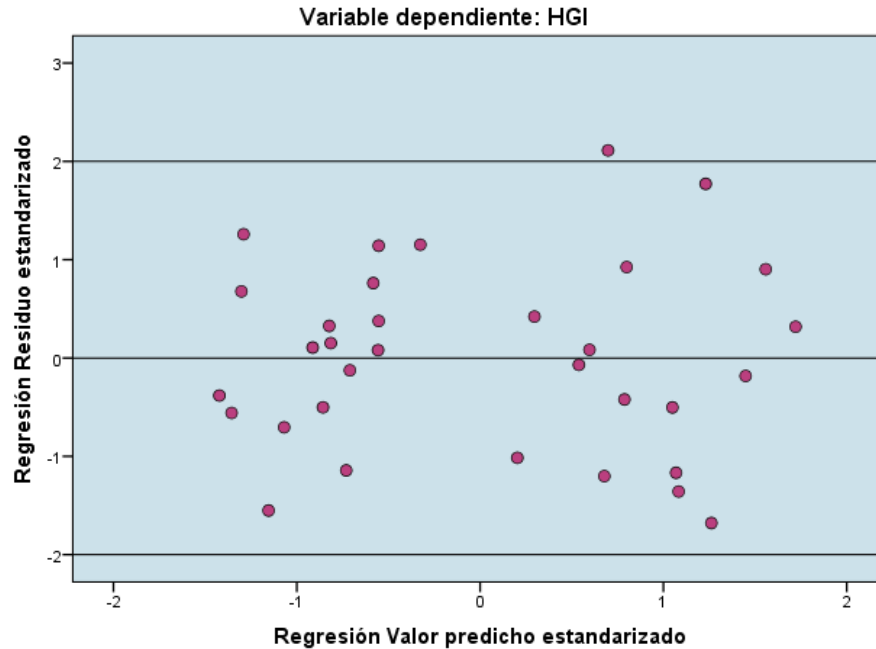


Figura 26. Gráfico de dispersión de puntos para homocedasticidad, software IBM SPSS Statistics.

3.4.5 Modelo matemático

Para la estimación del modelo matemático se implementaron sucesivos modelos con el fin de probar cada una de las variables y que significancia tenían a la hora de aportar al sistema predictor. Inicialmente comprobando el supuesto de linealidad con la variable a predecir, bajo este supuesto se establece que los únicos parámetros correlacionables son la Reflectancia Media Aleatoria de la Vitritina, Materia Volátil y el grupo maceral Liptinita.

Bajo este concepto fueron ingresadas las variables según el grado de dependencia al software IBM SPSS Statistics, que ha arroja los diferentes coeficientes que integraran la ecuación que predecirá el HGI (Tabla 16).

Tabla 16. Coeficiente del modelo matemático SPSS a partir de los análisis próximos.

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error estándar	Beta		
1	(Constante)	63,666	42,587		1,495	0,146
	RO	50,997	18,550	0,609	2,749	0,010
	MVbslmm	-1,324	0,856	-0,372	-1,546	0,133
	LIPImm	0,309	0,859	0,039	0,359	0,722

a. Variable dependiente: HGI

Teniendo en cuenta los resultados se plantea la ecuación predictora como una ecuación de regresión lineal múltiple, multiplicando el ajuste B por cada una de las variables y a su vez estas sumadas entre sí. (Ecuación 3).

$$\text{HGI} = 63,666 + 50,997 \cdot \text{Ro} - 1,324 \cdot \text{MVbslmm} + 0,309 \cdot \text{LIPImm}$$

Ecuación 3. Modelo integrado usando materia volátil (MVbslmm), reflectancia (Ro), y contenido de liptinita (LIPImm).

El modelo de regresión lineal múltiple tiene un coeficiente de correlación 0,941 muy próximo a 1 (correlación perfecta), el coeficiente de determinación satisface o explica el 88,5% de la variabilidad de la molturabilidad de los carbones bituminosos del sinclinal Checua-Lenguazaque. En la figura 27 puede observarse gráficamente la variación del HGI obtenido mediante los ensayos de laboratorio en comparación con el predicho mediante la utilización de la ecuación 3, que incluye determinaciones fisicoquímicas y petrográficas.

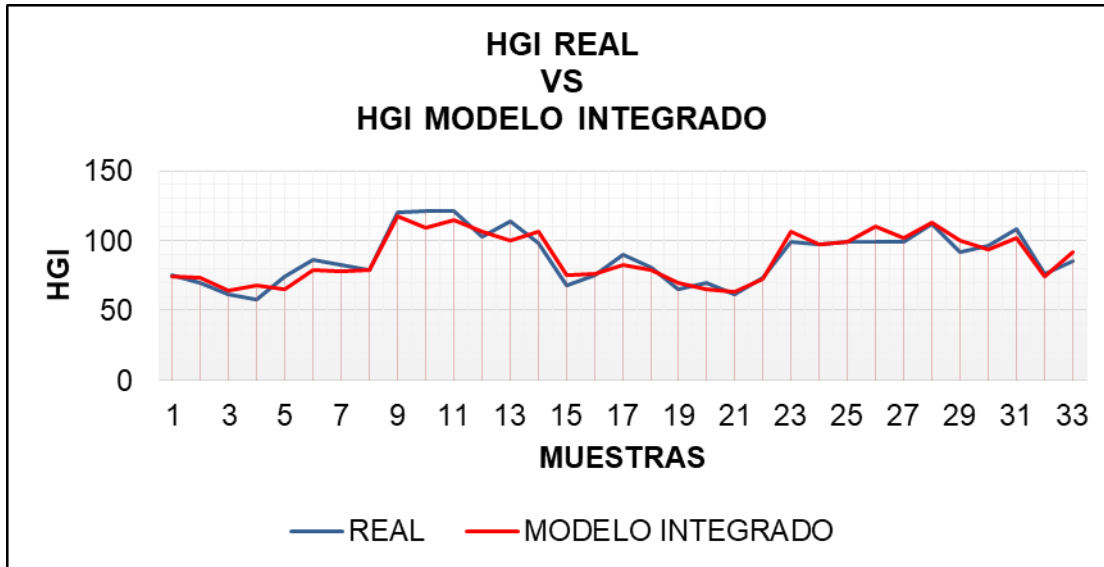


Figura 27. Valor real de HGI vs valor modelo integrado.

4. CONCLUSIONES

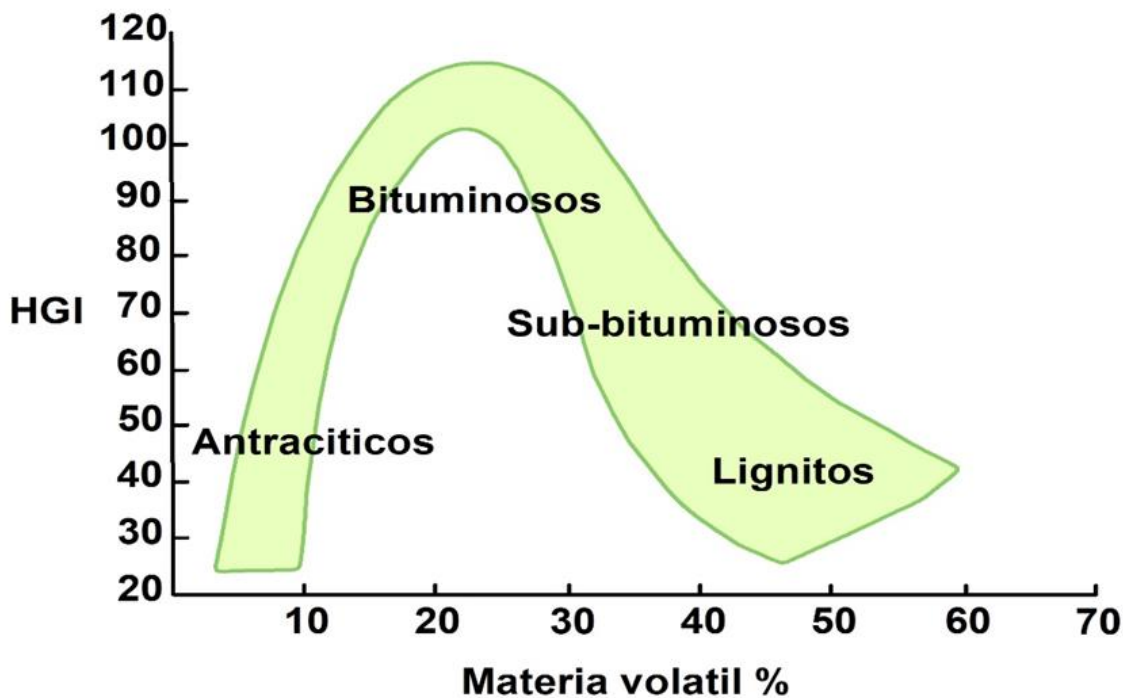
- Se ha establecido que los carbones bituminosos del sinclinal Checua Lenguaque tiene un comportamiento específico con las propiedades indicadoras del rango del carbón como la materia volátil y reflectancia media aleatoria de la vitrinita, influenciando la molturabilidad.
Para las clasificaciones ASTM e ISO se establece una serie de rangos dentro de los que oscilan los valores medios del índice de molienda hardgrove.
Clasificación ASTM-D388-13: carbones bituminosos altos volátiles (<70), medios volátiles (70-100) y bajos volátiles (>100).
Clasificación ISO-11760: carbones bituminosos C (<80), bituminosos B (80-110) y bituminosos A (>110).
- Los contenidos de humedad y azufre en los tres bloques estudiados en promedio son escasos, tienen bajos coeficientes de correlación con la molturabilidad del carbón, pero se ha evidenciado que en algunos casos alteran las condiciones del mismo favoreciendo tanto incrementos como disminución del índice de molienda.
- Estudios anteriores hacen referencia a la importancia del contenido de cenizas en los carbones, reportando que altos contenidos generan bajos índices de HGI, para los carbones del sinclinal Checua Lenguaque este reporte resulta irrelevante ya que no es evidente una correlación de las cenizas con el HGI, posiblemente se debe a que las cenizas están constituidas por minerales arcillosos, o de dureza similar a la del carbón.
- La reflectancia media de la vitrinita y los índices de molturabilidad presentan un comportamiento lineal con una alta correlación positiva en los carbones analizados, lo que indica que a medida que el rango del carbón aumenta también lo hace el Índice de Molienda Hardgrove (disminuye su dureza).
- Los grupos macerales han arrojado bajos coeficientes de correlación con el HGI, a excepción del grupo Liptinita que presenta una moderada correlación negativa, aportando significativamente a la predicción del Índice de Molienda Hardgrove.

- Los microlitotipos parecen no tener relevancia al correlacionar o influenciar la predicción del HGI, ya que en su gran mayoría presentan una baja o nula correlación con el HGI, exceptuando el bimaceral Duroclarita.
- Teniendo en cuenta las correlaciones interparametricas de los análisis próximos, azufre, petrográficos y fisicoquímicos en relación con el HGI, se estableció el modelo predictor lineal de regresión múltiple en el software IBM SPSS Statistics, con la capacidad de explicar el 88,5% de la variabilidad de la molturabilidad de los carbones bituminosos del sinclinal Checua-Lenguazaque a través de las variables que presentaban un alto coeficiente de correlación.

$$\text{HGI} = 63,666 + 50,997 \cdot \text{Ro} - 1,324 \cdot \text{MVbsImm} + 0,309 \cdot \text{LPIImm}$$

5. RECOMENDACIONES

- Involucrar más datos en el análisis estadístico que permita generar un modelo matemático acertado, ya que para el estudio se tuvo en cuenta tan solo 33 muestras analizadas, 5 para Sutatausa, 14 para Guachetá y 14 para Samacá.
- Extender el rango de estudio para entender el comportamiento de los carbones de menor y mayor rango. ya que este estudio hace referencia a los carbones bituminosos del sinclinal Checua-Lenguazaque, y se considera importante entender el comportamiento de los carbones con diferentes procesos diagenéticos.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Amaya, Erika; Mariño, Jorge; Jaramillo, C. (2010). Litofacies Y Ambientes De Acumulación De La Formación Guaduas En La Parte Central De La Cordillera Oriental – Implicaciones Paleogeográficas. *Boletín de Geología*, 32, numero(enero-junio 2010), 13–25.
- Arias, A. J., & Fragozo, C. A. (2013). Estimación Del Índice De Molienda Hardgrove Basado En Las Características Petrográficas Y Fisicoquímicas Utilizando Análisis Multivariado Para Carbones Suministrados a La Central Termoeléctrica De Paipa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barrea, J. (2016). Determinación de la madurez térmica de los carbones de la formación guaduas en el sinclinal checua – lenguazaque.
- Gómez, J., & López, M. (2017). Paleoenvironments of coals using organic petrography and their relationship with, 106.
- Guatame, C. L., & Sarmiento, G. (2004). Interpretación del Ambiente Sedimentario de los Carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque a partir del Análisis Petrográfico. *Geología Colombiana*, (29), 41–57.
- Hower, J. C., Graese, A. M., & Klapheke, J. G. (1987). Influence of microlithotype composition on hardgrove grindability for selected eastern Kentucky coals. *International Journal of Coal Geology*, 7(3), 227–244. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(87\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0166-5162(87)90038-3)
- Jorjani, E., Hower, J. C., Chehreh Chelgani, S., Shirazi, M. A., & Mesroghli, S. (2008). Studies of relationship between petrography and elemental analysis with grindability for Kentucky coals. *Fuel*, 87(6), 707–713. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.044>
- Luna, L. (2004). Ón C Col.
- Montoya, Diana María; Reyes, G. A. (2003). Geología de la plancha 209 zipaquirá. *Servicio Geológico Colombiano*, 156.
- Pérez, A., Borrego, A., Sierra, M., Algarra, A., & Montes, A. (2018). Innovación Docente - Carbón - Petrografía del carbón. Retrieved January 24, 2018, from <https://petrografiacarbon.es/>
- Sengupta, A. N. (2002). An assessment of grindability index of coal. *Fuel Processing Technology*, 76(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00236-3)
- Shahzad, M., Shahzad, M., Iqbal, M. M., & Hassan, S. A. (2014). An Assessment of Chemical Properties and Hardgrove Grindability Index of Punjab Coal An Assessment of Chemical Properties and Hardgrove Grindability Index of Punjab



Coal, (September 2015).

- Trimble, A. S., & Hower, J. C. (2003). Studies of the relationship between coal petrology and grinding properties. *International Journal of Coal Geology*, 54(3–4), 253–260. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00039-9)
- Vega, M. (2004). Cartografía geológica y caracterización de los mantos de carbón de la formación guaduas en los municipios de tause, cucunubá, y ráquira – samacá. sinclinales checu – lenguazaque y guachetá, <https://es.scribd.com/document/293348023/Geologia-yacimiento-carbon-formacion-guaduas>